



Universidad Carlos III de Madrid

Trabajo fin de grado

Implementación informática del método del triángulo de Duval

Miguel López García (Grado de ingeniería industrial eléctrica)

Tutora: María Belén García De Burgos

Índice:

1. Introducción	Pág. 5
1.1. Objetivo del trabajo	Pág. 7
1.2. Organización del documento	Pág. 7
2. Análisis de gases en transformadores	Pág. 8
2.1. Introducción	Pág. 8
2.2. Normativa	Pág.10
2.2.1. Normativa americana: IEEE C7.104	Pág.11
2.2.2. Normativa europea: IEC60599	Pág.13
2.3. Métodos de interpretación	Pág.16
2.3.1. Método de la relación de Rogers	Pág.16
2.3.2. Método IEC	Pág.18
2.3.3. Método de la relación de Dornenburg	Pág.19
2.3.4. Método del gas clave	Pág.21
2.3.5. Método del triángulo de Duval	Pág.23
3. Desarrollo de un programa informático para la aplicación del triángulo de Duval a la interpretación de los gases disueltos en el aceite del transformador	Pág.30
3.1. Descripción del programa	Pág.30
3.1.1. Función “Duval.m”	Pág.32
3.1.2. Función “Triangulo.m”	Pág.34
3.1.3. Función “Quehaces.m”	Pág.40
3.1.4. Función “To_ABC.m”	Pág.40
3.1.5. Función “To_XY.m”	Pág.41
3.1.6. Función “Leer_valores.m”	Pág.41
3.1.7. Función “Punto.m”	Pág.43
3.1.8. Función “Archivo.m”	Pág.46
4. Aplicación del programa a casos de ejemplo	Pág.49
4.1. Instrucciones para la ejecución del programa	Pág.49
4.2. Análisis de casos de ejemplo	Pág.52
4.2.1. Caso ejemplo 1: arco eléctrico en el transformador	Pág.52
4.2.2. Caso ejemplo 2: descargas parciales en el aceite de un transformador	Pág.55
4.2.3. Caso ejemplo 3: arco eléctrico en la celulosa de un transformador	Pág.58
4.2.4. Caso ejemplo 4: fallo térmico severo	Pág.61
4.2.5. Caso ejemplo 5: calentamiento del aceite de un transformador	Pág.63

4.2.6. Caso ejemplo 6: calentamiento del aislamiento celulosítico de un transformador	Pág.66
4.2.7. Caso ejemplo 7: sobrecalentamiento extremo del aceite de un transformador	Pág.70
4.3. Análisis conjunto de una batería de datos: arco eléctrico y sobrecalentamiento en un transformador	Pág.73
5. Conclusión	Pág.76
6. Bibliografía	Pág.78

1. Introducción.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética.

El uso del transformador cobra una gran importancia debido a su capacidad de variar la amplitud de la tensión, pudiéndola aumentar para un suministro y transporte más económico y luego disminuirla para poder operar con más seguridad los equipos.

En los inicios del transporte de energía, esta era trasladada en corriente continua lo que hacía al sistema muy ineficiente. Por este motivo se decidió que el transporte de energía se realizara con corriente alterna y a elevados niveles de tensión, para reducir las pérdidas de energía en la línea, para lo cual se hizo indispensable el uso de transformadores.

La regulación de tensión que alimenta el transformador es importante ya que determinará qué respuesta muestre ante diferentes cargas que se le puedan conectar.

Los fallos que se producen en los transformadores siempre implican grandes problemas. El corte del suministro de energía es, sin duda, el mayor de estos problemas y, por tanto, debe solucionarse lo antes posible.

Cuando un transformador sufre un fallo se debe determinar la causa que lo originó. Para solucionarlo se debe determinar el alcance del daño y tomar las medidas necesarias para que no vuelva a ocurrir.

Cuando se trata de transformadores tenemos que tener en cuenta que se trata de equipos muy complejos, muy caros y muy importantes por lo que se debe prestar la máxima atención a la hora de tratarlos.

Se deben seguir unos ciertos pasos para investigar cualquier fallo sufrido en un transformador:

1. Revisar el historial de mantenimiento del equipo.
2. Revisar los registros de operación de protecciones y alarmas.
3. Realizar un primer examen visual de los posibles daños externos.
4. Realizar pruebas de diagnóstico.
5. Realizar un examen interno del equipo.
6. Realizar más pruebas de diagnóstico.

7. Analizar la información adquirida y realizar un diagnóstico para establecer el origen del fallo y una posible reparación.
8. Incluir nuevas acciones en los planes de mantenimiento para evitar que se repita este fallo.

Existen dos tipos de incidencias de Transformadores donde debemos aplicar sistemas predictivos para detectar fallas incipientes o fallas que causaron la incidencia.

- Señales de Condición No Normal (Pre-falla)
- Salida intempestiva.

Proceso de una falla en Transformadores.

1. Servicio Normal
2. Condición de Pre-falla (señales de aviso)
3. Salida de servicio por falla con o sin colapso del Transformador.

Hoy en día el análisis de gases disueltos (DGA) es la prueba más utilizada para determinar el correcto funcionamiento de un transformador. En conjunto con otras pruebas, inspecciones y análisis el DGA es vital para determinar las posibles condiciones anómalas de los transformadores.

Existen dos normativas en uso la Normativa americana (IEEE C57.104) y la Normativa europea (IEC 60599) las cuales incluyen varios métodos de interpretación de gases como son: el método de Rogers, el método de Dornenburg, el método del gas clave y el del triángulo de Duval. Estos métodos son los más extendidos y acertados a la hora de interpretar los gases disueltos y detectar fallos en los transformadores.

Dentro de estos métodos de interpretación el que podríamos calificar de más acertado a la hora de determinar la naturaleza y severidad de una falla interna en un transformador es el método del triángulo de Duval. Este considera tres gases, el metano (CH_4), el etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2), como característicos de las fallas más críticas que se pueden producir en un transformador.

El triángulo de Duval se trata de un método muy utilizado en la actualidad y que ha demostrado ser muy preciso obteniendo un alto reconocimiento por parte de la comunidad científica.

1.1. Objetivo del trabajo.

Este trabajo está orientado al desarrollo y programación de una aplicación informática, mediante la herramienta de programación del programa MATLAB, que implemente el método de análisis de gases disueltos en el aceite de los transformadores del triángulo de Duval.

En la memoria se incluirá una descripción del método y de en qué consiste además del desarrollo del programa, describiendo el código y sus funciones.

1.2. Organización del documento.

Este trabajo de fin de grado consta de dos partes, una teórica y otra práctica. En la parte teórica se tratará el tema del análisis de gases disueltos en el aceite de los transformadores. Por otro lado, la parte práctica consistirá en crear un programa informático que implemente el que, a día de hoy, es el método más empleado en el análisis de gases disueltos: el triángulo de Duval.

Se realizará una revisión bibliográfica sobre el análisis de los gases disueltos en el aceite de los transformadores, las diferentes técnicas empleadas para dicho análisis y las normativas que los recogen.

De entre todos los métodos nos centraremos en el del triángulo de Duval para el cual se dedicará una especial atención ya que es el método que se ha implementado informáticamente.

2. Análisis de gases en transformadores.

2.1. Introducción.

Por lo general todos los transformadores contienen aceite en el interior de su cuba. Estos tienen funciones tanto dieléctricas (aislante eléctrico) como de disipación de calor (aislante térmico).

El aceite para transformador es de tipo mineral y está compuesto por una mezcla de distintos hidrocarburos.

Este aceite sufre una degradación debida al desgaste, con el tiempo, producido por el funcionamiento normal del transformador. Cuando esto sucede, el aceite se descompone dando lugar a diversos gases en su interior.

La descomposición del aceite puede deberse también a algún tipo de fallo en el transformador de tipo térmico o por descargas (arco producido por una rotura dieléctrica).

El proceso de descomposición del aceite depende de la distribución energética y térmica en la zona de falla y del tiempo durante el cual se somete al aceite a dicho estrés. Se trata de un proceso complejo con unas determinadas características estequiométricas. Por lo tanto no podemos hacer un pronóstico exacto de cuál será la degradación del aceite de un transformador.

Al producirse estos esfuerzos excesivos, las uniones o compuestos químicos del aceite y la celulosa pueden romperse. Esta descomposición del aceite del transformador da lugar a que se generen diferentes gases combustibles como hidrógeno (H₂), metano (CH₄), acetileno (C₂H₂), etileno (C₂H₄), y etano (C₂H₆).

Además, cuando la celulosa está involucrada, las fallas producen metano (CH₄), hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO), y dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 1. Principales gases analizados por DGA.

Hidrógeno	H ₂
Metano	CH ₄
Etano	C ₂ H ₆
Etileno	C ₂ H ₄
Acetileno	C ₂ H ₂
Monóxido de carbono	CO
Dióxido de carbono	CO ₂
Oxígeno	O ₂
Nitrógeno	N ₂

La aparición de ciertos gases en la cuba de un transformador, en mayor o menos medida es indicativo de la existencia de uno o varios fallos térmicos, eléctricos o de tipo corona en el transformador.

Los transformadores están presentes en todo tipo de instalaciones eléctricas y son esenciales a la hora de distribuir y transportar electricidad. También son necesarios para la correcta alimentación de equipos debido a la existencia de aparatos de alta, media y baja potencia.

Los transformadores, en especial los de gran potencia, son equipos muy costosos y, en la mayoría de casos, difícilmente reemplazables que requieren un mantenimiento adecuado para evitar el deterioro excesivo y poder así alargar su vida útil el mayor tiempo posible.

Un buen mantenimiento es clave para el buen funcionamiento de un transformador y en este aspecto juega un papel fundamental el estudio de los gases mediante el análisis de gases disueltos en un transformador.

Es muy importante un mantenimiento preventivo que evite fallos, así como una rápida detección de estos en caso de producirse. Cuanto menos dure y antes se corrija un

fallo menos deterioro sufrirá el transformador y antes volverá a estar en correcto funcionamiento.

Con los años se han buscado y desarrollado diversas técnicas para la correcta detección y medición de gases disueltos en transformadores, no obstante no se puede dar por hecho que el análisis de estos gases y la interpretación de su significado sean completamente exactas, más bien son bastante variables por lo que no podemos fiarnos ciegamente de los resultados obtenidos.

“Debe reconocerse que el análisis de estos gases y la interpretación de su significado no son actualmente una ciencia, sino un arte sometido a la variabilidad”. [1]

La presencia y cantidad de gas encontrado depende de diversos factores que afectan al transformador como pueden ser: el tipo, el tipo y la tasa de circulación del aceite, temperatura de la falla, su localización geográfica, el tipo de material en contacto con la falla y variables con respecto a los procedimientos de toma y medición de las muestras.

A pesar de no ser exacto, el análisis de gases disueltos en un transformador es una de las herramientas más importantes y utilizadas a la hora de diagnosticar el estado de un transformador ya que es el mejor método para detectar los diferentes defectos que se puedan producir.

Durante los años esta técnica ha sido ampliamente utilizada y en la actualidad existe una amplia experiencia sobre la interpretación de los resultados. Existen extensas bases de datos y distintos métodos de interpretación que han sido propuestos por distintos autores, dando lugar a una importante base de datos de más de 20000 registros.

Los principales indicadores de que existe alguna anomalía en el funcionamiento de un transformador son las tasas de crecimiento, individual y total, de las diferentes concentraciones de gases. En las normas IEC 60599 e IEEE C 57 104 se proponen métodos de interpretación de los resultados obtenidos en los análisis.

2.2. Normativa.

No existe una norma universal para la interpretación de los resultados obtenidos en el análisis de gases disueltos en el aceite de los transformadores. Por esta razón se debe tener en cuenta en qué región geográfica está instalado un transformador a la hora de aplicar una normativa.

Actualmente existen dos normas, la americana (IEEE C57.104) y la europea (IEC 60599) en cargadas de este propósito.

TABLA 2. Comparativa de límites aceptables de gases disueltos para las diferentes normas. Tomado de [9]

	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO ₂	TCG
*IEEE	100 101-700 701-1800 >1800	350 351-570 571-1400 >1400	120 121-400 401-1000 >1000	65 66-100 101-150 >150	50 51-100 101-200 >200	35 36-50 51-80 >80	2500 2500-4000 4001-10000 >10000	720 721-1920 1921-4630 >4630
**Electra (CIGRE)	28.6	289	42.2	85.6	74.6	--	3771	520
IEC 60599 Typical Range	60-150	540-900	40-110	50-90	60-280	3-50	5100-13000	
Manufact.	200 (250)	500 (1000)	100 (200)	100 (200)	150 (300)	15 (35)	-- --	1065 1985

*EN REVISIÓN

**VALORES CORREGIDOS 1978

() VALORES 6 – 7 AÑOS

A continuación se describirán los métodos de interpretación propuestos por las distintas normas vigentes.

2.2.1. Normativa americana: IEEE C57.104.

El primer paso a seguir una vez obtenidos los resultados del análisis de gases es valorar en que condición está el equipo. Para ello la norma americana emplea una tabla en la que aparecen los rangos de los diferentes gases y establece una serie de condiciones para determinar el estado del equipo.

TABLA 3. Límites de gases.

Estado	Límites de concentración de gases claves (ppm)							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG*
Condición 1	100	120	1	50	65	350	2500	720
Condición 2	101-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2501-4000	721-1920
Condición 3	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
Condición 4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

*Total dissolved combustible gas (gas combustible disuelto total).

- Condición 1 (de 0 a 720 ppm): significa que el transformador de potencia está operando de forma satisfactoria.
- Condición 2 (de 721 a 1920 ppm): a partir de 721 ppm se puede decir que el transformador no está operando de forma satisfactoria. Se debe realizar una investigación sobre posibles daños y tomar medidas al respecto porque puede haber algún fallo.
- Condición 3 (de 1921 a 4630 ppm): Se debe realizar una investigación de inmediato sobre el funcionamiento del transformador debido a un alto nivel de descomposición del aceite. Existe una alta probabilidad de fallo.
- Condición 4 (mayores a 4630 ppm): a partir de este nivel de gases, si el transformador continúa operando provocaría un fallo debido a la excesiva descomposición del aceite. Se debe intervenir en el transformador de inmediato.

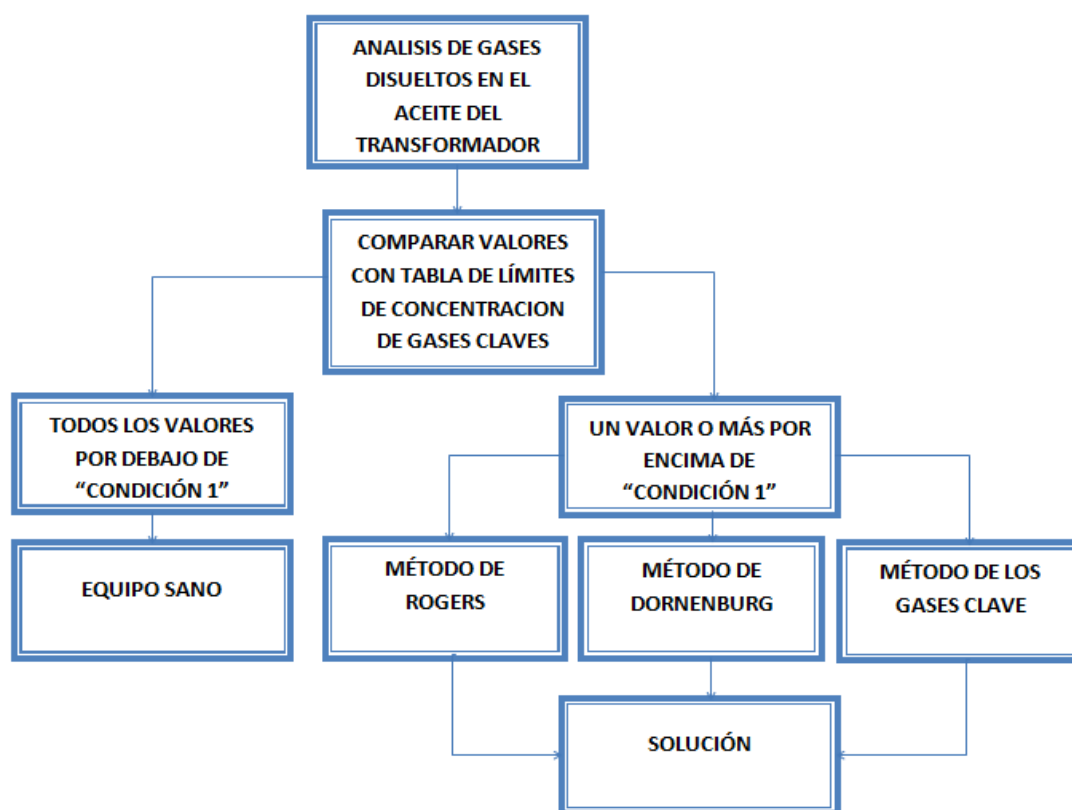
Esta normativa incluye, para la detección de posibles fallos en el transformador, los siguientes métodos de diagnóstico:

- Método de Rogers.
- Método de Dornenburg.
- Método de los gases clave.

Estos métodos serán descritos detalladamente más adelante en la sección 2.3 métodos de interpretación.

Debe ajustarse el intervalo de muestreo y el procedimiento operativo sobre la base de datos y la experiencia acumulada.

FIGURA 1. Esquema normativa americana. Tomado de [2]



2.2.2. Normativa europea: IEC 60599.

Una vez se han obtenido los resultados del análisis de gases disueltos, los valores obtenidos deberán ser comparados con los recogidos en las tablas de valores típicos de concentración de gases y de las velocidades de incremento.

TABLA 4. Valores típicos de concentración. Tomado de [2]

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

(1) Del inglés: "On Load Tap Changer " Cambiador de Tomas en Carga

TABLA 5. Velocidades típicas de incremento de gases. Tomado de [2]

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		35 - 132	10 - 120	32 - 146	5 - 90	260 - 1060	1700 - 10000
Sin OLTC (1)	0 - 4						
OLTC (1) comunicado	21 - 37						

(1) Del inglés: "On Load Tap Changer " Cambiador de Tomas en Carga

Si uno o más valores obtenidos en el análisis son superiores a los que aparecen en estas tablas se debe calcular las relaciones de gases.

Si se dispone de varias muestras a lo largo de un periodo de tiempo, se comprueba si la evolución del defecto es positiva.

Se tiene que comprobar si la celulosa tiene o no algún papel en las causas del fallo. Esto puede comprobarse mediante la relación CO₂/CO. Si es menos que 3 significa que el papel está involucrado.

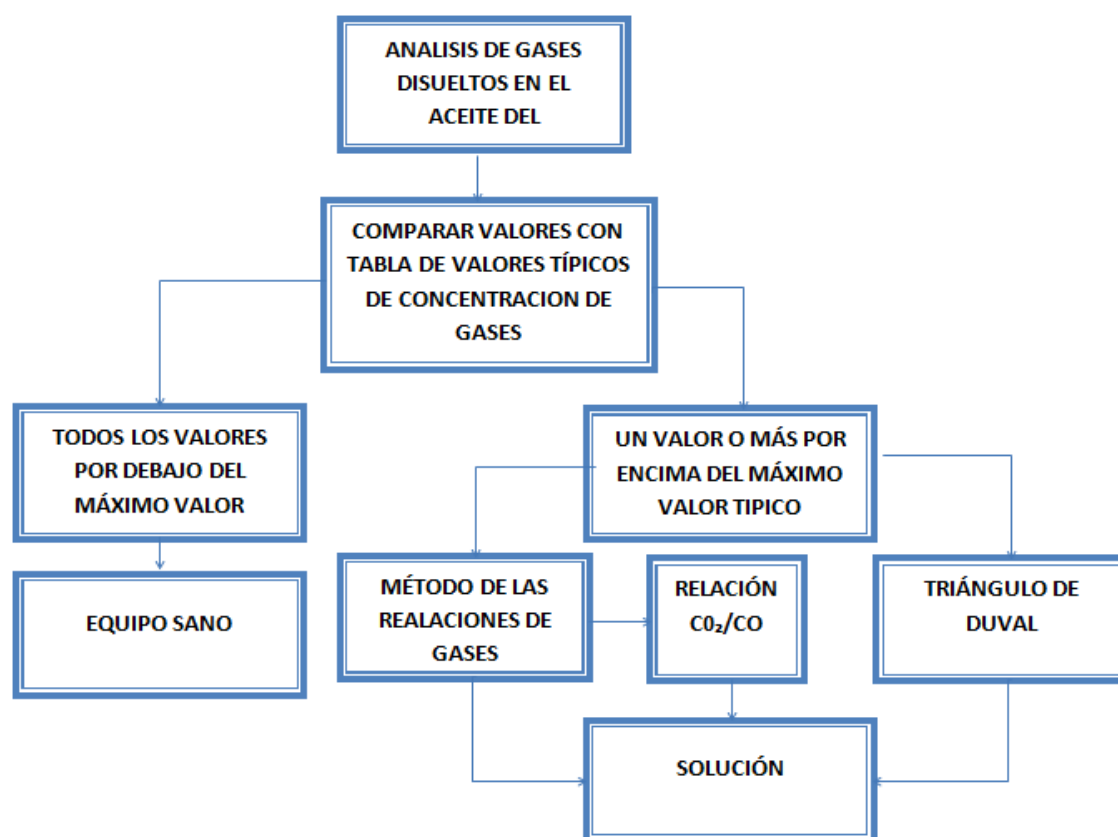
Una vez identificado el fallo, la norma recomienda realizar más tomas de muestras en periodos más cortos de tiempo y dependiendo del nivel del fallo emprender o no acciones inmediatas.

Esta normativa incluye, para la detección de posibles fallos en el transformador, los siguientes métodos de diagnosis:

- Método de Rogers.
- Método del triángulo de Duval.

Estos métodos serán descritos detalladamente más adelante en la sección 2.3 métodos de interpretación.

FIGURA 2. Esquema normativa europea. Tomado de [2]



2.3. Métodos de interpretación.

2.3.1. Relación de Rogers.

Este método utiliza cuatro relaciones de gases. Estas son: CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 y C_2H_2/C_2H_4 . Estas relaciones sirven para diagnosticar fallos mediante unas tablas que muestran los rangos de proporciones y su respectivo fallo.

TABLA 6. Relación de códigos de gases.

Relación de gases	código
CH_4/H_2	i
C_2H_6/CH_4	J
C_2H_4/C_2H_6	K
C_2H_2/C_2H_4	I

TABLA 7. Relación de códigos de códigos de Roger.

Relación de códigos	Rangos	Códigos
i	≤ 0.1	5
	$> 0.1, < 1$	0
	$\geq 1, < 3$	1
	≥ 3	2
J	< 1	0
	≥ 1	1
K	< 1	0
	$\geq 1, < 3$	1
	≥ 3	2
I	< 0.5	0
	$\geq 0.5, < 3$	1
	≥ 3	2

Combinando la codificación de estas dos tablas obtenemos doce resultados que corresponden a doce tipos de fallos diferentes en el transformador. Las diferentes combinaciones y su respectivo fallo asignado se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 8. Clasificación de los códigos de Roger.

i	j	k	L	Fallo
0	0	0	0	Deterioro normal
5	0	0	0	Descarga parcial
1-2	0	0	0	Sobrecalentamiento ligero (<150°C)
1-2	1	0	0	Sobrecalentamiento (150°C -200°C)
0	1	0	0	Sobrecalentamiento (200°C -300°C)
0	0	1	0	Sobrecalentamiento de conductores
0	0	1	0	Corrientes de circulación
1	0	2	0	Núcleo y tanque recalentados en uniones
0	0	0	1	Descarga eléctrica sin flujo de corriente

0	0	1-2	1-2	Arqueo con alto flujo de corriente
0	0	2	2	Continúa provocando a los potenciales flotantes
5	0	0	1-2	Descargas parciales son seguimiento

2.3.2. Relación IEC.

Este método tiene su origen a partir del método de Roger pero en este caso se elimina la relación C_2H_6/CH_4 , ya que el rango de temperatura limitado de descomposición solo se indica en un rango.

Las otras relaciones de gas, en este método, tienen distintos rangos de código con respecto al método de Roger.

Hay nueve tipos de fallos diferentes enumerados en las siguientes tablas según su rango:

TABLA 9. Códigos de relación IEC.

Relación de códigos	rangos	Códigos
I	<0.1	0
	0.1 - 1	1
	1 - 3	1
	>3	2
i	<0.1	1
	0.1 - 1	0
	1 - 3	2
	>3	2
k	<0.1	0
	0.1 - 1	0
	1 - 3	1
	>3	2

TABLA 10. Clasificación basada en códigos de relación IEC.

l	i	k	Fallo
0	0	0	Envejecimiento normal
*	1	0	Descarga parcial de baja densidad de energía
1	1	0	Descarga parcial de alta densidad de energía
1* 2	0	1-2	Descarga en baja energía. Chispas continuas
1	0	2	Descarga de alta energía con flujo de energía a través de él
0	0	1	Fallo térmico (<150°C)
0	2	0	Fallo térmico (150°C – 300°C)
0	2	1	Fallo térmico (300°C – 700°C)
0	2	2	Fallo térmico (>700°C)

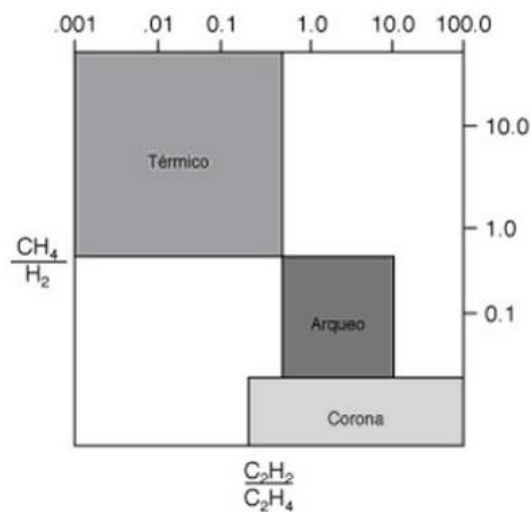
2.3.3. Relación de Dornenburg.

En este método se utiliza la relación de los gases CH_4/H_2 , C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 y C_2H_2/C_2H_4 y, como en otros métodos, la concentración de cada uno de ellos indicará cual será el fallo del transformador.

La razón de utilizar estas relaciones es que el volumen del transformador no influya en el diagnóstico de tal forma que las unidades de concentración de los límites máximos permitidos no dependan del volumen del transformador ya que en un transformador mayor con un mismo volumen de gas disuelto no tiene por qué tener el mismo fallo que otro de menos volumen.

De esta manera Dornenburg crea una gráfica de escala logarítmica en la que se encuentran tres tipos de fallos (térmico, arco eléctrico y descargas parciales o efecto corona).

FIGURA 3. Método de Dornenburg.



Para poder usar este método es necesario que exista una generación de cada gas suficiente para su análisis y superar una concentración de L1. A continuación se muestra la tabla en la que quedan establecidos los gases y su concentración L1.

TABLA 11. Concentraciones L1.

Gas clave	Concentración L1 (ppm)
Hidrógeno	100
Metano	120
Monóxido de carbono	350
Acetileno	35
Etileno	50
Etano	65

Las concentraciones de gases se obtienen extrayéndolos y separándolos mediante cromatografía de gases. Se considera el equipo defectuoso si, al menos, la concentración de uno de los gases H_2 , CH_4 , C_2H_2 o C_2H_4 dobla el valor L1 dado para el mismo y uno de los otros tres valores supera el L1.

Existe una tabla de diagnóstico en la que se puede comprobar con los valores obtenidos cual es el fallo del transformador.

TABLA 12. Diagnóstico de fallos para el método de la relación de Dornenburg.

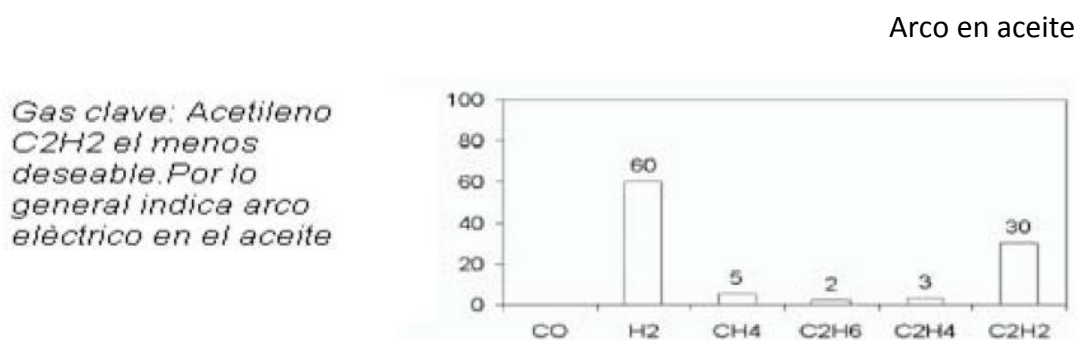
Diagnóstico de fallos sugeridos	Relación 1 (R1)		Relación 2 (R2)		Relación 3 (R3)		Relación 4 (R4)	
	CH_4/H_2		C_2H_2/C_2H_4		C_2H_2/CH_4		C_2H_6/C_2H_2	
	aceite	Espacio de gas	aceite	Espacio de gas	aceite	Espacio de gas	aceite	Espacio de gas
1.Descomposición térmica	>1	>0.1	<0.75	<1	<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
2.Corona de baja intensidad DP	<0.1	<0.01	No significativa		<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
3.Arco de baja intensidad	>1	>0.01	>0.75	>1	>0.3	>0.1	<0.4	<0.2

2.3.4. Método del gas clave.

El método de los gases clave utiliza el gas individual en lugar de calcular los coeficientes de los gases para detectar los posibles fallos producidos en el transformador.

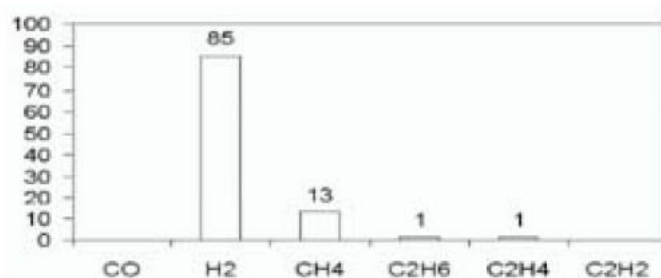
Este método está basado en la cantidad de gases liberados en el aceite cuando se produce un fallo. La presencia de los gases depende de la temperatura o la energía que romperá el vínculo atómico del aceite aislante.

FIGURA 4. Criterios de diagnóstico de gases clave.



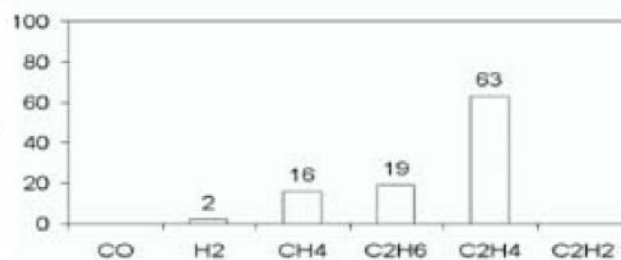
Descarga parcial en aceite (corona)

Gas clave: Hidrogeno (H₂) grandes cantidades asociados con descarga corona



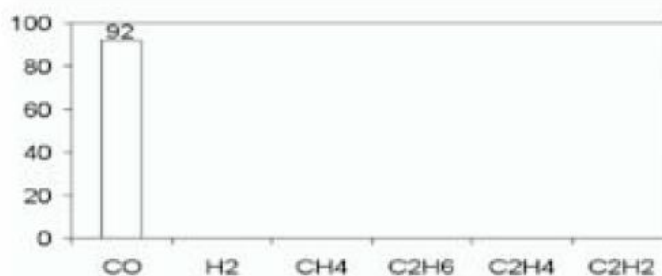
Aceite sobrecalentado

Gas clave: etileno C₂H₄ producida por degradación térmica del aceite



Celulosa sobrecalentada

Gas clave: Producida por Monóxido de Carbono (CO) producida por envejecimiento termico del papel



Los gases combustibles utilizados son los siguientes:

- CO : Monóxido de carbono
- H₂ : Hidrógeno
- CH₄ : Metano
- C₂H₆ : Etano
- C₂H₄ : Etileno
- C₂H₂ : Acetileno

La ventaja de este método es su gran simplicidad, ya que solo se atenderá a los gases clave obtenidos en el análisis para diagnosticar el fallo. Dependiendo de qué gas y en qué proporción se encuentre diluido se tratará de un fallo u otro.

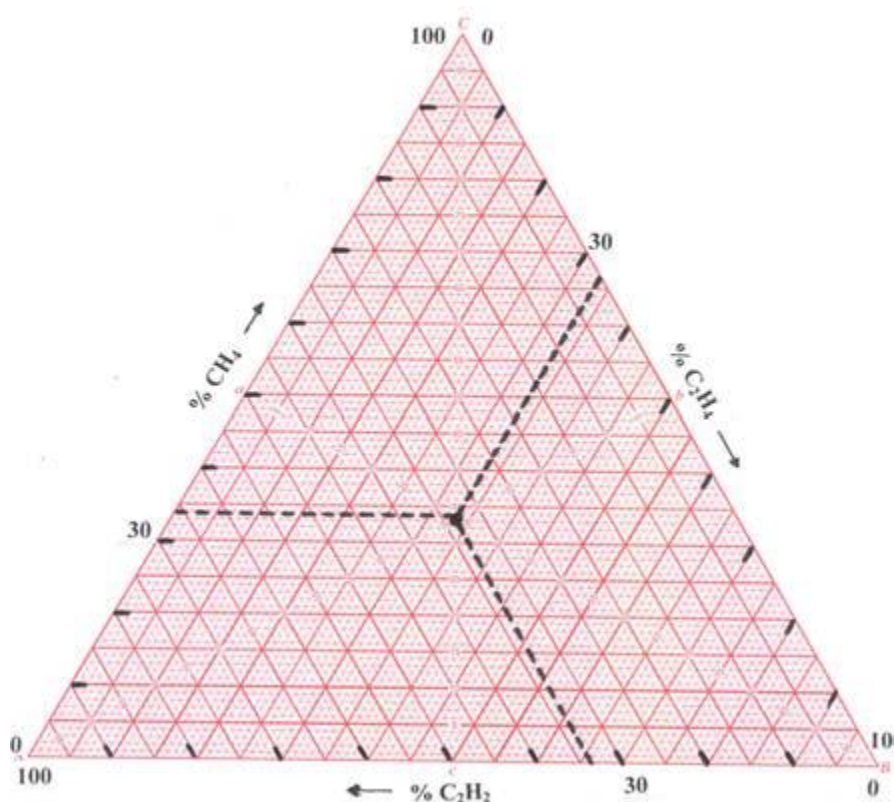
2.3.5. Triángulo de Duval.

El triángulo de Duval es un método de diagnóstico para aceite aislante en equipos de alta tensión, generalmente transformadores, que ha demostrado ser preciso y fiable durante muchos años y que cada vez cuenta con mayor popularidad, hasta llegar al punto de ser uno de los métodos de diagnóstico de gases disueltos en aceite más utilizado en la actualidad. Su principal ventaja es que proporciona siempre un diagnóstico con un porcentaje bajo de error en el resultado.

Este método, igual que el método de gases claves, relaciones de Rogers y de Dornenburg, es empírico.

Michel Duval propuso este método por primera vez en 1974. Está basado en el uso de tres gases de hidrocarburos correspondientes al aumento de los niveles de energía necesarios para la formación de gases en transformadores en servicio.

Figura 5. Triángulo de Duval. Tomado de [8]



El método consiste en dibujar un triángulo en el que cada lado corresponde a un gas. Los lados están divididos escalarmente indicando las proporciones de cada uno de los gases estudiados.

El triángulo, a su vez, está dividido en distintas zonas las cuales corresponden a un fallo diferente cada una.

Una vez halladas las proporciones de los tres gases se trazan tres líneas paralelas a los lados del triángulo, las cuales confluirán en un punto dentro del triángulo. Este punto indicará el fallo que, presumiblemente, tendrá el transformador.

Los gases que considera Duval son: metano (CH_4) como gas característico clave indicativo de efecto corona o descargas parciales, etileno (C_2H_4) indicativo de punto caliente, y acetileno (C_2H_2) gas característico de la presencia de arco interno.

Los gases acetileno (C_2H_2) y etileno (C_2H_4) se utilizan en todos los métodos de interpretación para representar fallos de alta energía (por ejemplo, arcos) y fallos de alta temperatura. El hidrógeno (H_2) se produce en grandes cantidades para fallos de baja energía, tales como descargas parciales.

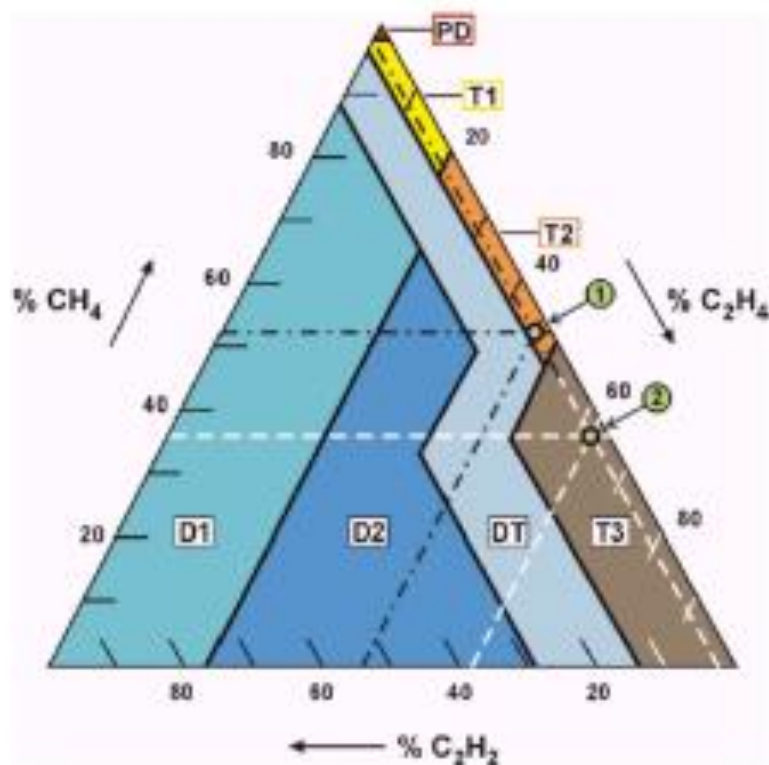
Sin embargo el metano (CH_4) es también representativo de estos fallos y siempre se forma a partir del hidrógeno, en menor cantidad pero lo suficiente como para tenerlo en cuenta. La ventaja del metano, y la razón por la que Duval lo eligió para su triángulo es que no solo permite identificar estos defectos sino que ofrece mejores resultados en el diagnóstico del resto de fallos que cuando se utiliza el hidrógeno.

Este buen comportamiento del triángulo con el metano podría estar relacionado con el hecho de que el hidrógeno se difunde mucho más rápidamente que los gases de hidrocarburos a través de las juntas y soldaduras o incluso del metal. Por lo tanto, las proporciones de los gases utilizando hidrógeno en el triángulo serán menos exactas y fiables por la pérdida de este gas que si utilizamos solamente gases de hidrocarburos, que tienen tasas de difusión mucho más bajas y comparables.

Este método es especial. Ya que el diagnóstico del fallo se realiza mediante la obtención de un punto dentro de un mapa triangular cuyas coordenadas están dadas por la proporción de cada uno de los gases utilizados en el método lo que lo hace un método visual y muy intuitivo.

Realizando varios ensayos a un mismo transformador defectuoso en diferentes periodos de tiempo y dibujando cada uno de los puntos obtenidos del estudio en el triángulo de Duval, es posible observar cómo evoluciona el fallo ocurrido en el transformador. Esta técnica requiere de mucha experiencia adquirida a través de varios ensayos en un mismo transformador y en transformadores distintos.

FIGURA 6. Triángulo de Duval. Zonas a color. Tomado de [4]



PD: Descargas parciales.

D1: Descargas de baja energía

D2: Descargas de alta energía

T1: Fallas térmicas, $t < 300^\circ\text{C}$

T2: Fallas térmicas, $300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$

T3: Fallas térmicas, $t > 700^\circ\text{C}$

La zona DT corresponde a la zona donde se superponen las fallas térmicas y eléctricas.

Las coordenadas del triángulo correspondientes a los resultados del ADGD, en ppm pueden calcularse de la siguiente forma:

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = 100X / (X+Y+Z)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = 100Y / (X+Y+Z)$$

$$\% \text{CH}_4 = 100Z / (X+Y+Z)$$

Siendo:

$x = \text{C}_2\text{H}_2$ en microlitros por litro.

$y = \text{C}_2\text{H}_4$ en microlitros por litro.

$z = \text{CH}_4$ en microlitros por litro.

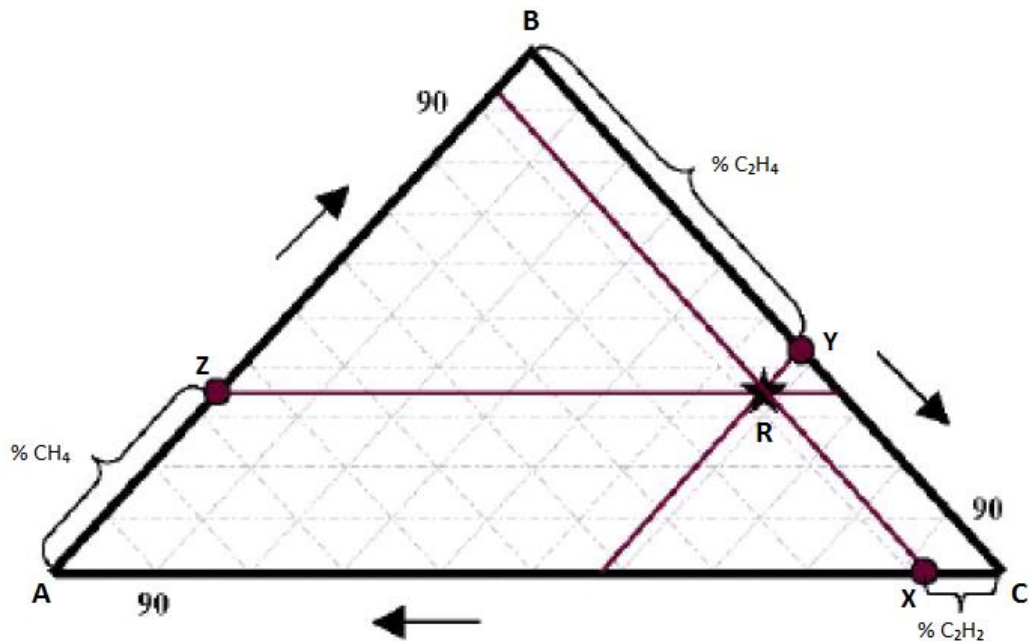
- Descargas parciales: descargas de plasma frío (corona), genera burbujas de gas o huecos, con la posible formación de x-cera en el papel.
- Descargas de baja energía: descargas parciales con emisión de chispas, inducen poros y perforaciones carbonizadas en el papel. Bajo consumo de energía que induce un arco, la perforación o el seguimiento de la superficie carbonizada de papel, formación de partículas de carbono en el aceite.
- Descargas de alta energía: provocan graves daños en el papel o una gran formación de partículas de carbono en el aceite. Fusión del metal. Degradación grande del aceite. Dispara los equipos de seguridad y alarma de gas.
- Falla térmica ($t < 300^\circ\text{C}$): el papel adquiere un color marrón ($> 200^\circ\text{C}$) llegando incluso a carbonizarse ($> 300^\circ\text{C}$).
- Fallas térmicas ($300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$): la carbonización del papel provoca la formación de partículas de carbono en el aceite.
- Fallas térmicas ($t > 700^\circ\text{C}$): gran formación de partículas de carbono en el aceite. Coloración del metal (800°C) llegando incluso a fundirse al alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C .

Los tres gases deben sumar 100%, luego se trazan las cantidades en el eje del papel. El área en que se cruzan las líneas representa el diagnóstico de descarga o térmico.

El sistema consta de un triángulo equilátero con tres vértices A, B y C tal y como se muestra en la figura 7. Las proporciones de los tres gases % C_2H_2 , % C_2H_4 y % CH_4 deben ser transformadas a coordenadas triangulares y, una vez transformadas, estarán determinadas por los puntos X, Y y Z respectivamente. Estas tres fracciones adquieren valores de 0 a 100 y la suma de las tres debe ser siempre 100.

Una vez obtenidos los puntos X, Y y Z estos deben converger en un único punto R que señalará la zona del fallo que sufre el transformador, para ello se trazarán tres líneas paralelas con origen en X, Y y Z. para el punto X la línea se trazará paralela a BC, para el punto Y la línea debe ser paralela a AB y para Z paralela a AC. La intersección de estas tres líneas indicaran en qué lugar dentro del triángulo se encuentra el punto R.

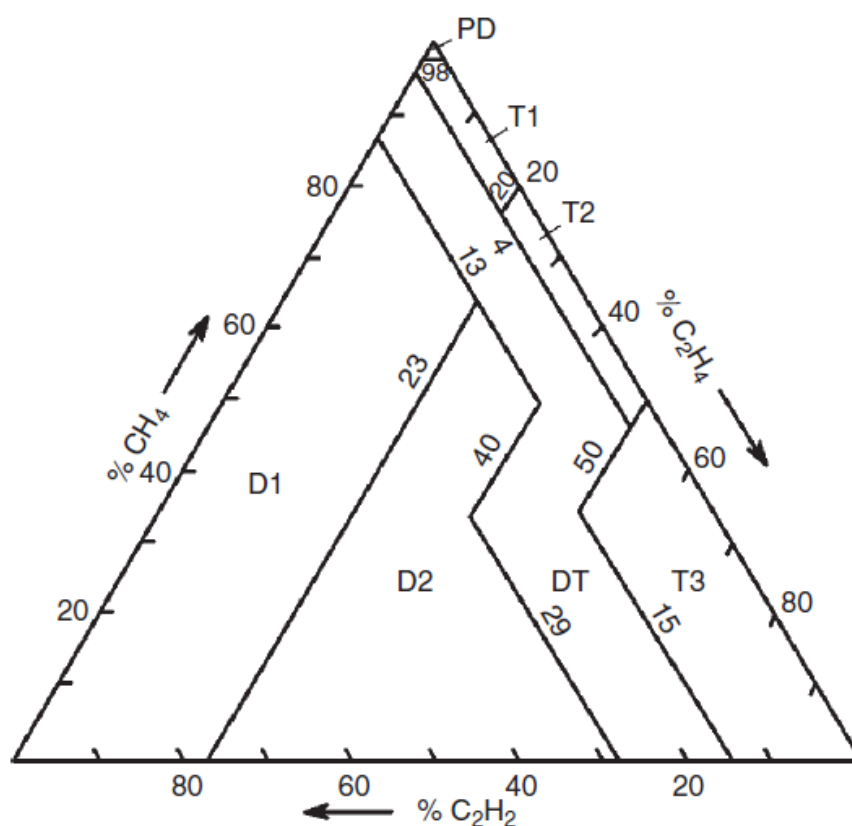
FIGURA 7. Ejemplo triángulo de Duval. Tomado de [4]



Los límites de las zonas del Triángulo se han deducido empíricamente a partir de un gran número de casos de defectos inspeccionados visualmente en los transformadores de todo el mundo durante los últimos 60 años.

Para poder determinar las diferentes zonas del triángulo de Duval debemos definir un polígono para cada zona. Tenemos siete polígonos para definir las diferentes zonas que estudia este método.

Figura 8. Coordenadas y zonas de falla del triángulo de Duval. Tomado de [8]



Cada zona está delimitada por líneas definidas por unas proporciones determinadas de cada gas.

Tabla 13. Límites de zonas. Tomado de [9]

PD	98% CH_4			
D1	23% C_2H_4	13% C_2H_2		
D2	23% C_2H_4	13% C_2H_2	38% C_2H_2	29% C_2H_2
T1	4% C_2H_2	10% C_2H_4		
T2	4% C_2H_2	10% C_2H_4	50% C_2H_4	
T3	15% C_2H_2	50% C_2H_4		

Una vez dibujado el triángulo con sus zonas correspondientes ya está listo para poder encontrar el punto R mediante las proporciones de los gases disueltos y diagnosticar el fallo que pueda tener.

3. Desarrollo de un programa informático para la aplicación del triángulo de Duval a la interpretación de los gases disueltos en el aceite del transformador.

El principal objetivo de este trabajo es el de desarrollar un programa informático con Matlab que nos permita implementar el método del triángulo de Duval, de forma sencilla, en nuestro ordenador.

La idea de desarrollar un programa informático que implementase el triángulo de Duval fue tomada de artículo “*A Software Implementation of the Duval Triangle Method*” [7] y la base de código para empezar a trabajar en el diseño del programa fue sacado de una página web [10].

Principalmente, el programa, tiene dos funciones. Una función es la de introducir los datos, en ppm, de los gases que queremos analizar (CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2) para que el programa se encargue de hallar las coordenadas y sitúe el punto dentro del triángulo. Como ya se ha visto antes, dependiendo de en qué zona esté situado el punto en el triángulo el transformador sufrirá un daño u otro.

La segunda función del programa será la de leer un documento de texto (.txt) en el que haya guardadas varias proporciones de los gases objeto de análisis. El programa leerá el archivo y representará en el triángulo todos los puntos pertenecientes a dichas proporciones. Esta función puede ser útil para, por ejemplo, observar cómo evoluciona un fallo en un transformador a lo largo de un periodo de tiempo estudiando la variación de las proporciones de gases encontrados disueltos en el aceite.

A continuación se explicará paso a paso el programa incluyendo capturas de pantalla del código para poder visualizarlo y explicado paso a paso para comprenderlo de una manera sencilla.

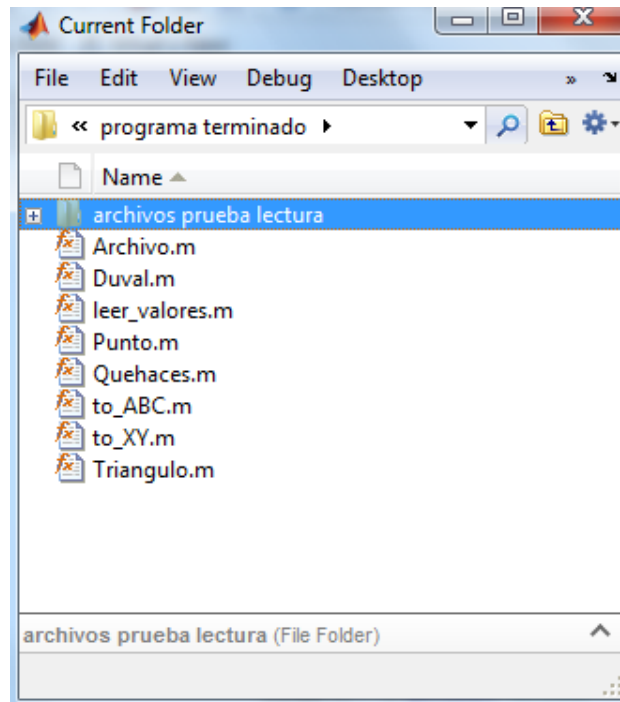
3.1. Descripción del programa.

El programa está dividido en varias funciones de Matlab. Cada función tiene su cometido para el buen funcionamiento de todas las instrucciones del programa.

Antes de entrar a explicar en qué consiste el programa y su código es necesario explicar la diferencia entre una variable global y una variable entorno. Matlab emplea estos dos tipos de variables dependiendo del uso que se las quiera dar.

Una variable global es la que almacena datos que usaremos en varias funciones mientras que la variable entorno solo puede usarse en la función en la que se define.

Figura 9. Funciones programa Matlab.



La función principal es “Duval”, la cual correremos a la hora de ejecutar el programa. Es la encargada de llamar al resto de funciones.

A continuación se hará una presentación del resto de funciones y un pequeño resumen de su papel dentro del programa:

- **Quehaces:** crea un cuadro de diálogo en el que se elige entre las diferentes funciones del programa.
- **Triangulo:** abre una ventana en la que dibuja el triángulo con sus diferentes zonas coloreadas.
- **Leer_valores:** lee los valores en ppm introducidos. Tanto manualmente como a través del documento de texto.
- **To_XY:** pasa de coordenadas ABC a coordenadas XY que son las que lee Matlab.
- **To_ABC:** pasa de coordenadas XY a coordenadas ABC para poder situar el punto en el triángulo.

- **Punto:** presenta una ventana en la que introduciremos manualmente las cantidades de gas en ppm, dibuja el punto dentro del triángulo, pone las proporciones de cada uno de los gases del triángulo y coloca el fallo correspondiente con el texto sombreado.
- **Archivo:** abre una ventana de exploración para poder buscar el documento de texto que queremos leer y dibuja todos los puntos guardados en dicho documento.

3.1.1. Función “Duval.m”.

Esta función es la principal del programa. No realiza ninguna acción específica a excepción de hacer las llamadas al resto de funciones. Sin ella el programa no funcionaría y es la función que se deberá cargar a la hora de poner en funcionamiento el programa.

Código 1. Variables globales.

```
function Duval

global TRG_SCALE
global S_TRG
global A
global B
global UserData
global h_TRG
```

Estas son las variables globales, las cuales emplearemos en varias de las funciones del programa. Por este motivo son globales.

Código 2. Opciones.

```
TRG_SCALE = 100;
S_TRG = [];
resp=Quehaces;
```


Carga la función “Quehaces.m” y guarda la opción escogida en la variable “resp”. Más adelante se verá en que consiste la función “Quehaces.m”.

Código 3. Bucle opciones.

```
while (resp~=3)
    close all;

    Triangulo;
    if (resp ==1)

        Archivo;
    else
        if (resp==2)

            Punto;
        end
    end
end
```

Lo primero que hace el bucle es cargar la función “Triangulo.m”, de esta manera se abre una ventana con el triángulo de Duval dibujado en ella.

Luego se lee la respuesta dada y, dependiendo de cuál sea la acción que deseemos realizar, se cargará una función u otra.

Código 4. Botón continuar.

```
uicontrol('Style','pushbutton','String','Continuar','Callback','uiresume(gcf)');

uiwait(h_TRG);

resp=Quehaces;
end

close all;
```

Al cargar las funciones “Punto.m” o “Archivo.m”, una vez representado el punto correspondiente a las proporciones de gases deseadas o los puntos almacenados en el documento de texto se cargará un botón de continuar que deberemos presionar con el

ratón para finalizar la función. De esta forma podremos visualizar el punto o los puntos representados con tranquilidad.

Por último se vuelve a cargar la función “Quehaces.m” para poder seguir manejando el programa.

Si se selecciona la opción salir (resp=3) se cierra todo.

3.1.2. Función “Triangulo.m”.

Esta función es la encargada de dibujar el triángulo y presentar la interface principal del programa. Aunque parezca sencilla, esta es la función más larga y compleja de todas.

En primer lugar se inicializan las variables globales que nos servirán en el resto de funciones.

Código 5. Variables globales.

```
global TRG_SCALE  
global S_TRG  
global A  
global B  
global UserData  
global h_TRG
```

Para comenzar a dibujar el triángulo primero dibujaremos uno vacío sobre el que introduciremos más tarde cada una de las zonas de falla.

Código 6. Triángulo vacío

```
TRG = [  
0, 0, TRG_SCALE  
TRG_SCALE, 0, 0  
0, TRG_SCALE, 0]';  
  
xy = to_XY(TRG, A, B);  
h_pTRG = patch(xy(1, :), xy(2, :), [.3 .3 .3]);  
set(h_pTRG, 'EdgeColor', 'k')  
set(h_pTRG, 'LineWidth', 1)  
  
xy_TRG = xy;  
s_xy.id = 1;  
s_xy.name = 'TRG';  
s_xy.handle = h_pTRG;  
s_xy.polygon = xy_TRG;  
s_xy.comment = 'Real-Time Diagnostic';  
s_xy.Color = get(h_pTRG, 'FaceColor');  
  
s_xy.data{1, 1} = 'TRG_SCALE';  
s_xy.data{1, 2} = TRG_SCALE ;  
s_xy.data{2, 1} = 'A';  
s_xy.data{2, 2} = A ;  
s_xy.data{3, 1} = 'B';  
s_xy.data{3, 2} = B ;  
S_TRG = [S_TRG s_xy];
```

A continuación se dibujan cada una de las zonas de falla y se le asigna un color. Para poder delimitar las zonas introduciremos las coordenadas que las limitan dentro del triángulo.

Todas las zonas se dibujan de manera similar, con lo cual, a continuación se mostrará cómo se dibuja una de ellas, en concreto la zona D2 correspondiente al fallo de descargas de alta energía.

Código 7. Zona D2 triángulo.

```
% Zona D2 (poligono)
D2 = [
TRG_SCALE-23, 0, 23
13, TRG_SCALE-(13+23), 23
13, TRG_SCALE-(13+40), 40
29, TRG_SCALE-(29+40), 40
29, 0, TRG_SCALE-29
]';
xy = to_XY(D2, A, B);
h_pD2 = patch( xy(1, :), xy(2, :), [0.8398 0.5664 0.3750]);
set(h_pD2, 'EdgeAlpha', 0)

xy_D2 = xy;
s_xy.name = 'D2';
s_xy.handle = h_pD2;
s_xy.polygon = xy_D2;
s_xy.comment = 'D2 Descargas de alta energía';
s_xy.Color = get(h_pD2, 'FaceColor');
S_TRG = [S_TRG s_xy];
S_TRG(end).id = 1 + S_TRG(end-1).id;
```

En primer lugar se crea una matriz en la que introducimos las coordenadas que delimitan la zona y luego se define la zona, se le da nombre y color.

Una vez dibujado el triángulo, le añadiremos detalles que lo harán más vistoso de cara al usuario.

Código 8. Divisiones del triángulo.

```
set(gca, 'visible', 'off')

TICK_SIZE = 1;
Tick1 = linspace(10, 90, 9);
Tick1 = [Tick1; 0*ones(1, size(Tick1, 2))];
Tick1 = [Tick1; TRG_SCALE - sum(Tick1) ];

Tick2 = linspace(10, 90, 9);
Tick2 = [Tick2; TICK_SIZE*ones(1, size(Tick2, 2))];
Tick2(2, [mod(Tick2(1, :), 20) == 0]) = 1.63*TICK_SIZE;
Tick2 = [Tick2; TRG_SCALE - sum(Tick2) ];

for j = 0:2
    csT1 = circshift(Tick1, j);
    csT2 = circshift(Tick2, j);
    for i = 1 : size(csT1, 2)
        abc = [csT1(:, i) csT2(:, i)];
        xy = to_XY(abc, A, B);
        h_L = line( xy(1, :), xy(2, :));
        set(h_L, 'Color', 'k')
        if mod(Tick2(1, i), 2) == 1,
            set(h_L, 'LineWidth', 2.2)
        else
            set(h_L, 'LineWidth', 1)
        end
    end
end
```

En este fragmento de código se muestra como se crean y dibujan en el triángulo las divisiones de cada uno de los ejes del triángulo.

Con estas divisiones escalares es mucho más fácil visualizar la proporción de cada gas.

El siguiente código coloca los números de las divisiones en su sitio.

Código 9. Escala de los ejes.

```
%crea las etiquetas de los divisores de los ejes
Lb11 = linspace(20, 80, 4) + 3;
Lb11 = [Lb11; -3*ones(1, size(Lb11, 2))];
Lb11 = [Lb11; TRG_SCALE - sum(Lb11) ] - cos(pi/3);

xy = to_XY(Lb11, A, B);
for i = 1:size(Lb11, 2),
    text(xy(1, i), xy(2, i), sprintf('%g', 2*Tick1(1, i)))
end

Lb11 = linspace(20, 80, 4) + 1;
Lb11 = [Lb11; -(2/cos(pi/3))*ones(1, size(Lb11, 2)) ];
Lb11 = [Lb11; TRG_SCALE - sum(Lb11) + 1];

abc = circshift(Lb11, 1);
xy = to_XY(abc, A, B);
for i = 1:size(Lb11, 2),
    text(xy(1, i), xy(2, i), sprintf('%g', 2*Tick1(1, i)))
end

Lb11 = linspace(20, 80, 4);
Lb11 = [Lb11; -3*cos(pi/3)*ones(1, size(Lb11, 2))];
Lb11 = [Lb11; TRG_SCALE - sum(Lb11) ] - cos(pi/3);

abc = circshift(Lb11, 2);
xy = to_XY(abc, A, B);
for i = 1:size(Lb11, 2),
    text(xy(1, i), xy(2, i), sprintf('%g', 2*Tick1(1, i)))
end
```

Para saber qué lado del triángulo pertenece a cada gas, colocaremos una etiqueta indicándolo.

Primero definiremos lo que queremos que aparezca en cada una de las etiquetas. El contenido de esta variable va entrecomillado para indicar que se trata de un texto. La barra baja que precede a los números indica que estos deben aparecer como subíndices.

Código 10. Etiquetas de los lados del triángulo.

```
str_Lb1a = '%C_2H_2';
str_Lb1b = '%CH_4';
str_Lb1c = '%C_2H_4';
```

Una vez creadas las etiquetas solo falta colocarlas en pantalla. Para ello definimos la posición en la que deseamos que aparezca dando las coordenadas, imprimiéndola por pantalla e indicando la alineación del texto.

A continuación se muestra como se coloca la primera de las etiquetas a modo de ejemplo.

Código 11. Código que coloca las etiquetas de los gases.

```
%posicion de esta etiqueta en ternarias
abc =[58, -10, TRG_SCALE-(58-10)]';
%posicion de esta etiqueta en ejes x e y
xy = to_XY(abc, A, B);
%define una propiedad de la imagen (define un texto que voy a meter en la
% imagen, con su posicion dentro d la misma)
h_Ta = text(xy(1)+3, xy(2), sprintf('%s', str_Lbla));
%asigna a la imagen esta propiedad (la etiqueta con su posicion) y la
%coloca alineada horizontalmente y centrada
set(h_Ta, 'HorizontalAlignment', 'center');
```

Por último se guardan las variables de entorno que contienen las etiquetas de cada eje y la posición de la imagen en la que se coloca en otras variables de tipo global para que puedan ser utilizadas por otras funciones.

Código 12. Datos almacenados en variables globales.

```
UserData.h_Ta = h_Ta ;
UserData.h_Tb = h_Tb ;
UserData.h_Tc = h_Tc ;

UserData.str_Lbla = str_Lbla ;
UserData.str_Lblb = str_Lblb ;
UserData.str_Lblc = str_Lblc ;
end
```

3.1.3. Función “Quehaces.m”.

Esta función carga una ventana con tres botones que contienen las opciones ‘archivo’, ‘datos’ y ‘salir’. Dependiendo de qué botón se presione el programa cargará una función u otra.

Según qué opción se elija la variable ‘resp’ almacenará un valor que servirá para cargar la función correspondiente desde la función “Duval.m”.

Código 13. Carga de diálogo de opciones del programa.

```
function resp = Quehaces()

%se inicializa la respuesta para que entre por primera vez en el bucle
% crea un dialogo para saber si se desean probar más valores
boton = questdlg('que desea hacer?', ...
    'nuevo fichero', ...
    'archivo','datos', 'salir', 'salir');
% comprueba la respuesta
switch boton
    case 'archivo'
        resp = 1;
    case 'datos'
        resp = 2;
    case 'salir'
        resp = 3;
end
end
```

Antes de continuar con el resto de funciones merece la pena explicar el funcionamiento de las funciones ‘To_ABC’ y ‘To_XY’. Estas dos funciones que, a pesar de ser muy cortas en comparación con el resto, son muy importantes para que el programa funcione de manera correcta.

3.1.4. Función “To_ABC.m”.

Esta función sirve para transformar las coordenadas XY en coordenadas ternarias (ABC).

La razón de querer cambiar el tipo de coordenadas es muy simple: Matlab abre una ventana cuadrada, como todas las aplicaciones, con coordenadas XY, que son las que se usan habitualmente, pero nuestro programa funciona con un triángulo y busca un punto situado dentro de ese triángulo a partir de tres valores correspondientes a cada una de las proporciones de gas disuelto. Esta es la clave de las coordenadas ABC.

Código 14. Función ABC

```
function abc = to_ABC(xy)
    x = xy(1);
    y = xy(2);

    b = y/sin(pi/3);
    a = 100 - (x + b*cos(pi/3));
    c = 100 - (a + b);
    abc = [a b c]';
end
```

3.1.5. Función “To_XY.m”.

Esta función es muy sencilla. Básicamente convierte las coordenadas ternarias en coordenadas bidimensionales XY, que son con las que trabaja Matlab, para poder dar la posición exacta de cada uno de los puntos y poder situarlos.

Código 15. Función XY.

```
function xy = to_XY(abc, A, B)
    xy = A* abc + B*ones(size(B,2), size(abc,2));
end
```

3.1.6. Función “Leer_valores.m”.

Esta función crea una ventana que aparecerá para pedirnos que introduzcamos las cantidades de gases encontrados en el aceite analizado.

En primer lugar se crea la ventana aportándole un nombre, unas características, unos valores por defecto y definiendo las etiquetas que nos darán las instrucciones para saber dónde introducir cada valor.

Código 16. Carga ventana para introducir valores.

```
prompt = {'Introduce C2H2:', 'Introduce CH4:', 'Introduce C2H4'};  
%titulo de la ventana  
dlg_title = 'Concentraciones';  
num_lines = 1;  
%valores por defecto  
def = {'0', '0', '0'};  
%crea la ventana  
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
```

Los valores introducidos se guardan por defecto como string (cadena), este tipo de datos nos serviría para trabajar con números enteros, pero para poder trabajar sin problemas convertiremos estos valores a tamaño doble palabra para los que se puede introducir decimales.

Código 17. Convertir a doble palabra.

```
ain=str2double(answer(1));  
bin=str2double(answer(2));  
cin=str2double(answer(3));
```

Con la cantidad de gases introducida y almacenada calcularemos las proporciones de cada uno de los gases. Estas proporciones serán las que nos indiquen que tipo de fallo tienen el transformador.

Código 18. Cálculo de proporciones de gases.

```
a=ain/(ain+bin+cin)*100;  
b=bin/(ain+bin+cin)*100;  
c=cin/(ain+bin+cin)*100;
```

Por último guardamos estos valores en un vector que apunta a cada uno de los lados del triángulo para poder situar el punto dentro de este.

Código 19. Vector punto.

```
vect=[100-a-(b*cos(pi/3)),b*sin(pi/3),c];  
end
```

3.1.7. Función “Punto.m”.

Esa función extrae los valores introducidos en la función “Leer_valores.m” y representa el punto en el triángulo.

Código 20. Carga valores introducidos.

```
CurPt = leer_valores;  
%extrae del vector los valores de x e y y los guarda en dos variables  
x_CurPt = CurPt(1, 1);  
y_CurPt = CurPt(1, 2);
```

Esta parte sirve para crear el punto, ubicarlo y darle color. Además, pasa sus coordenadas de bipolares a ternarias para situarlo con exactitud dentro del triángulo.

Código 21. Creación del punto en pantalla.

```
set(hplot, 'XData', x_CurPt, 'YData', y_CurPt, 'Color', [1 1 1]);  
abc_CurPt = to_ABC([x_CurPt, y_CurPt]');
```

Extrae los valores correspondientes a las proporciones de los gases y a continuación crea con ellos tres vectores que servirán para conformar la matriz que vamos a utilizar para calcular las coordenadas de los puntos que se colocan en los ejes del triángulo.

Código 22. Proporciones de los gases.

```
a = abc_CurPt(1);  
b = abc_CurPt(2);  
c = abc_CurPt(3);  
  
abc_ntrsc_a = [a, 0, (TRG_SCALE - a)]';  
abc_ntrsc_b = [(TRG_SCALE - b), b, 0]';  
abc_ntrsc_c = [0, (TRG_SCALE - c), c]';
```

A continuación pasa esas coordenadas a coordenadas bipolares para poder situar en la imagen los puntos que se sitúan en cada uno de los tres ejes del triángulo.

Código 23. Situación del punto.

```
xy = to_XY ( [abc_ntrsc_a abc_ntrsc_b abc_ntrsc_c], A, B);  
  
xy_ntrsc_a = xy(:, 1);  
xy_ntrsc_b = xy(:, 2);  
xy_ntrsc_c = xy(:, 3);
```

Lo siguiente que hará el programa será dibujar las líneas punteadas que van de los ejes al punto que indica el estado en el que estamos.

Primero, si ya están definidas en las variables globales, se copian de ellas. En el caso de que sea la primera vez que se ejecuta el programa, este creará las líneas punteadas y las almacenará en tres variables globales.

Código 24. Creación de las líneas del punto.

```
h_La = UserData.h_La;
h_Lb = UserData.h_Lb;
h_Lc = UserData.h_Lc;

if isempty(h_Lb)
    h_Lb = line([x_CurPt xy_ntrsc_b(1)], [y_CurPt xy_ntrsc_b(2)]);
    set(h_Lb, 'LineStyle', ':', 'Marker', 'o', 'Color', 'k')
    set(h_Lb, 'MarkerSize', 5)
    set(h_Lb, 'LineWidth', 2)

    UserData.h_Lb = h_Lb;
end
```

A partir de la segunda ejecución los datos ya están contenidos en las variables globales, con lo cual se pueden cargar directamente con el siguiente código:

Código 25. Dibujo de las líneas del punto.

```
set(h_La, 'XData', [x_CurPt xy_ntrsc_a(1)], 'YData', [y_CurPt xy_ntrsc_a(2)]);
set(h_Lb, 'XData', [x_CurPt xy_ntrsc_b(1)], 'YData', [y_CurPt xy_ntrsc_b(2)]);
set(h_Lc, 'XData', [x_CurPt xy_ntrsc_c(1)], 'YData', [y_CurPt xy_ntrsc_c(2)]);
```

Para que aparezca en cada uno de los lados del triángulo una etiqueta indicando que gas es las copiaremos desde la variable global en la que se encuentran y, a continuación, las imprimiremos por pantalla, esta vez acompañadas de sus respectivos porcentajes que hayamos anteriormente.

Código 26. Etiquetas de gases con proporciones.

```
h-Ta = UserData.h-Ta;
h-Tb = UserData.h-Tb;
h-Tc = UserData.h-Tc;

str_Lb1a = UserData.str_Lb1a;
str_Lb1b = UserData.str_Lb1b;
str_Lb1c = UserData.str_Lb1c;

set(h-Ta, 'string', [str_Lb1a(2:end) ' = ' sprintf('%.1f%%', a)]);
set(h-Tb, 'string', [str_Lb1b(2:end) ' = ' sprintf('%.1f%%', b)]);
set(h-Tc, 'string', [str_Lb1c(2:end) ' = ' sprintf('%.1f%%', c)]);
```

A continuación se comprueba en que zona del triángulo se encuentra el punto. Una vez encontrado el punto e identificada la zona en la que se encuentra almacena el comentario que describe la zona de fallo correspondiente y el color con el que está coloreada. El nombre de la zona y el color se encuentran en variables creadas en la función “Triangulo.m”. Una vez concluido esto sale del bucle.

Código 27. Carga color y zona de fallo.

```
for i=2:8
    xv = [S_TRG(1,i).polygon(1,:) S_TRG(1,i).polygon(1,1)];
    yv = [S_TRG(1,i).polygon(2,:) S_TRG(1,i).polygon(2,1)];

    if (inpolygon(x_CurPt,y_CurPt,xv,yv)==1)

        comentario = S_TRG(1,i).comment;
        color_de_fondo = S_TRG(1, i).Color;

        break;
    end
end
```

Para indicar de qué falla el transformador, mostrará por pantalla el color y el nombre de la zona de fallo. Se añade código para colocarlo arriba a la izquierda.

Código 28. Muestra por pantalla color y zona de fallo.

```
xy = [0 92];

h_Ta = text(xy(1), xy(2), sprintf('%s', comentario), 'BackgroundColor', color_de_fondo;%.9 .9 .9));

set(h_Ta, 'HorizontalAlignment', 'left');
```

3.1.8. Función “Archivo.m”.

Esta función obtiene los valores, correspondientes a las cantidades de gases, guardados en un archivo guardado y representa los puntos de fallo pertenecientes a estos datos.

Los datos deben estar guardados en un documento de texto (.txt) que es el tipo de archivo que leerá el programa.

Lo primero que aparece en pantalla cuando se elige esta opción es una ventana en la que abrir el documento en su ubicación.

Código 29. Abre el archivo con los datos que interesan.

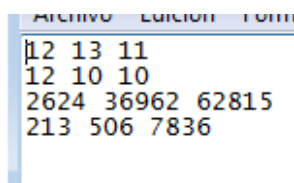
```
[nombre_archivo, ubicacion] = uigetfile('*.txt','Seleccione el fichero .txt con los valores de entrada');  
%crea un string con la direccion completa del archivo seleccionado  
direccion = [ubicacion nombre_archivo];  
%abre el archivo seleccionado  
archivo= fopen(direccion);
```

Se guarda la ubicación del documento y se abre para leer los datos que contiene.

La función va recorriendo el archivo, de principio a fin, con un bucle, leyendo los datos que contiene uno a uno y procesándolos para que finalmente se puedan representar los puntos correspondientes.

Para que el programa pueda leer correctamente el archivo el formato que debe tener tiene que ser de tres columnas, separadas por un espacio. En la primera columna se pondrá la cantidad de C_2H_2 , en la segunda columna la cantidad de CH_4 y en la tercera la cantidad de C_2H_4 .

Figura 10. Ejemplo de archivo.



Archivo	Ejemplo	Formato
12	13	11
12	10	10
2624	36962	62815
213	506	7836

Código 30. Lectura de archivo y representación.

```
while(feof(archivo) == 0)
    %lee una terna de valores
    abc = fscanf(archivo, '%g %g', 3);
    %calcula los porcentajes
    abc= abc*100/(abc(1)+ abc(2)+abc(3));
    %los convierte a valores de los ejes X e Y
    xy = to_XY(abc, A, B);
    %representa el punto
    plot(xy(1),xy(2), 'k+');
end
%cierra el archivo
fclose(archivo);
end
```

Finalmente el archivo se cierra.

4. Aplicación del programa a casos de ejemplo.

A continuación se utilizará el programa para demostrar su funcionamiento con algunos casos reales sacados del libro *“Guía para el mantenimiento del transformador”* de S.D.Myers [3]. Los casos recogidos en ese libro incluyen los resultados de los análisis de gases disueltos de distintos transformadores, algunos de los cuales sufrieron fallos.

4.1. Instrucciones para la ejecución del programa.

Lo primero que nos aparece al ejecutar el programa es la ventana, mostrada en la figura 11, que contiene las tres opciones disponibles para ejecutar: archivo, datos y salir.

La pestaña archivo carga la función que nos permitirá abrir un documento de texto y representar los puntos correspondientes a las cantidades de gas que en él se encuentran.

La pestaña datos carga la función que nos permite introducir las cantidades de gases y nos indica el fallo que sufre el transformador y la zona y el punto del triángulo en el que se encuentra.

La pestaña salir para la ejecución del programa y lo cierra.

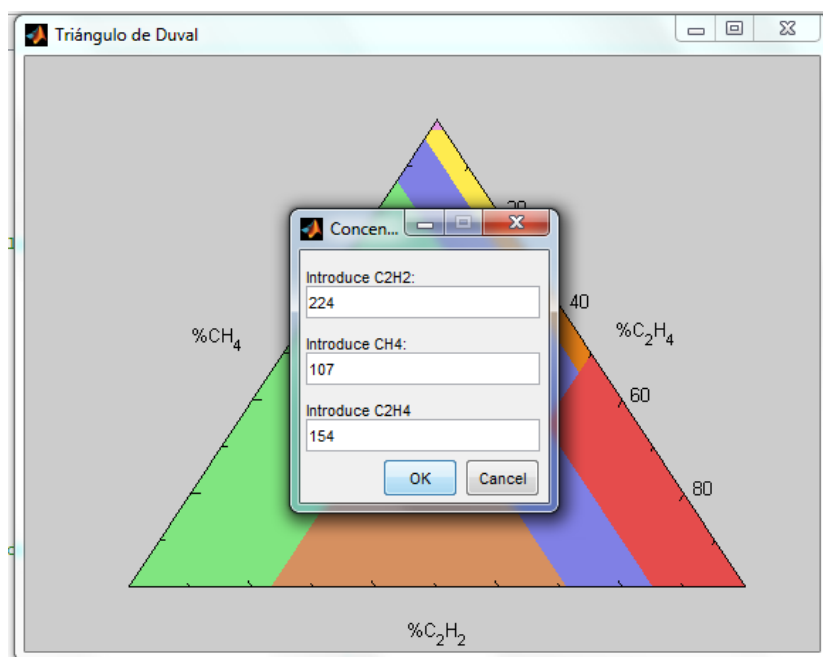
Figura 11. Ventana de opciones.



Primero probaremos la opción datos y luego la opción archivo con un documento de texto de ejemplo creado para esta prueba.

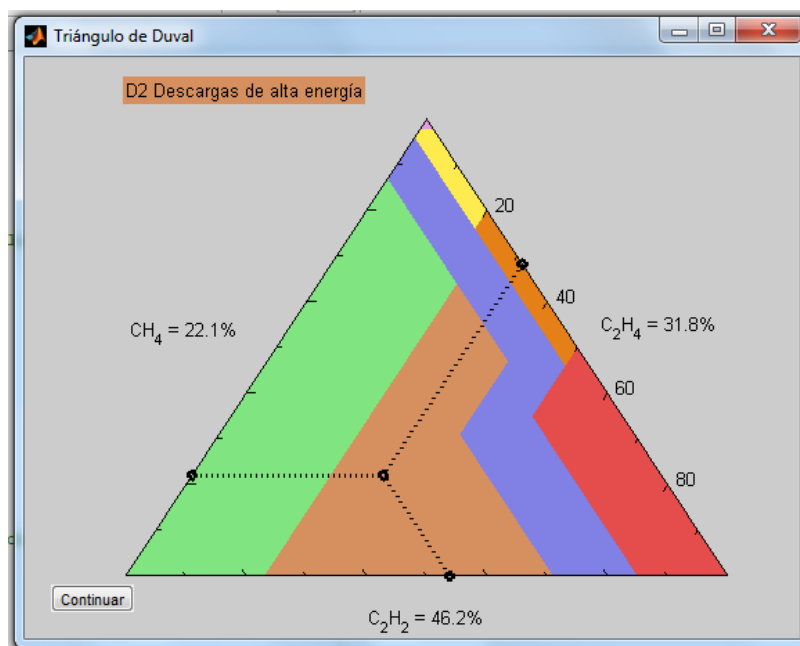
Cuando hacemos clic en la pestaña datos nos aparecerá una ventana en la que se encuentra dibujado el triángulo de Duval y sobrepuesta otra ventana en la que podremos introducir las cantidades de gas que deseamos estudiar.

Figura 12. Ventana introducción de gases.



Introduciremos las cantidades que queramos que represente y le damos a la pestaña ok para que nos muestre el punto correspondiente en el triángulo.

Figura 13. Ejemplo de diagnóstico.



Ligado a la etiqueta de cada gas se puede observar cuál es su correspondiente proporción.

También podemos ver cómo, en la parte superior izquierda, se muestra la zona del triángulo en la que se encuentra y el fallo que sufre el transformador sombreado del color con el que está representada dicha zona.

Para seguir ejecutando el programa tenemos, en la parte inferior izquierda, un botón con la palabra “continuar” que nos mostrará de nuevo la ventana de opciones del programa.

Figura 14. Botón continuar.



4.2. Análisis de casos de ejemplo.

A continuación se probará el programa con los casos reales sacados del libro de Myers [3] y se compararán los resultados obtenidos gracias al programa con los que se habrían obtenido con el método de la relación de Rogers. Para compararlos, ya que el método del triángulo de Duval pertenece a la normativa europea, se usará la normativa europea para analizar los gases mediante el método de Rogers.

Los casos de ejemplo analizados mediante el método de la relación de Rogers serán tomados del trabajo *“interpretación del análisis de gases disueltos en aceite”*[2].

4.2.1. Caso ejemplo 1: arco eléctrico en el transformador.

Este ejemplo pertenece a un arco producido en el transformador.

La información incluida en el libro de Myers [3] se muestra en la tabla 14 e incluye diagnóstico y hallazgos.

Los resultados incluidos en la tabla 14 corresponden a un transformador de 20.000 KVA situado en zona urbana.

Tabla 14. Ejemplo 1. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
02/21/00	127	6215	71620	107	174	11	973	154	224	79605	797

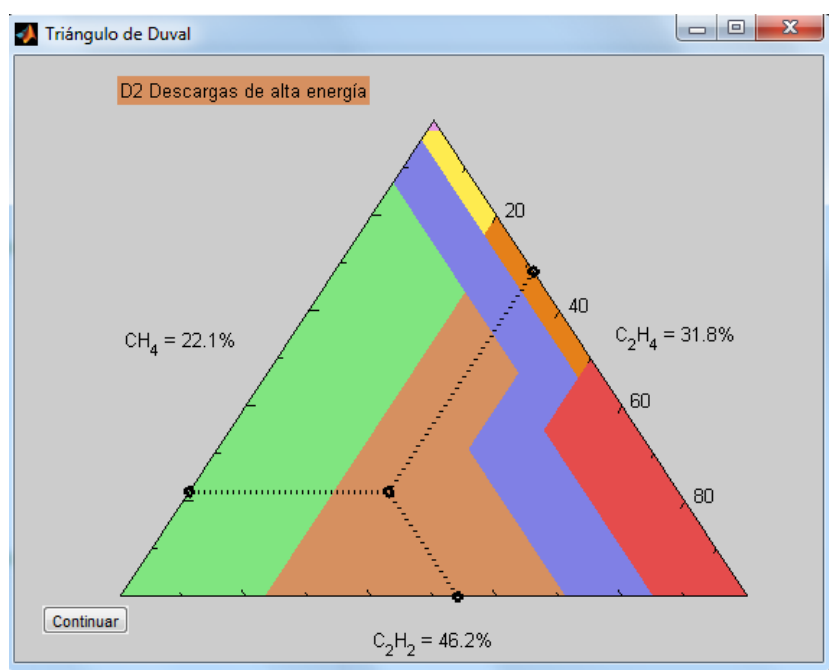
Diagnóstico: el gas clave, acetileno, indica una condición de arco con alguna celulosa involucrada.

Hallazgos: había circulado corriente por la unidad hacia una falla externa. Cuando los devanados secundarios se movieron se originó un arco entre el secundario y el núcleo.

Aunque el análisis cromatográfico nos da las cantidades de los principales gases analizados, para el método del triángulo de Duval solo tendremos en cuenta los ppm del metano (CH_4), el etileno (C_2H_4) y el acetileno (C_2H_2).

Estos ppm se introducen en las casillas correspondientes tal y como se muestra en la figura 12 y, al hacer clic en la pestaña “ok” obtendremos el resultado mostrado en la figura 15.

Figura 15. Ejemplo 1.



Cómo se puede observar en la figura 15, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “descargas de alta energía” lo que concuerda con lo descrito en el libro de Myers [3] que habla de una condición de arco con alguna celulosa involucrada.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C_2H_2	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

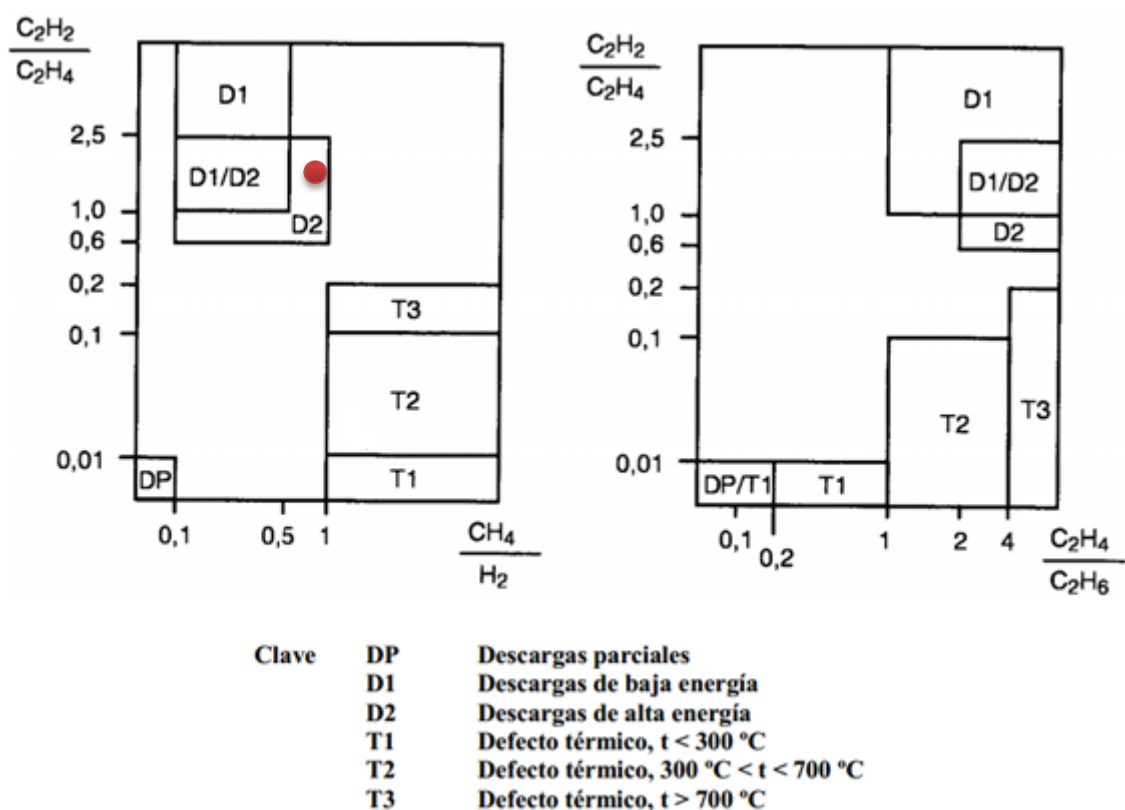
(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

El valor del acetileno se encuentra fuera del rango de valores típicos obtenidos, por lo tanto, es necesario realizar un estudio sobre el transformador.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C_2H_2 / C_2H_4	R1: CH_4 / H_2	R5: C_2H_4 / C_2H_6
1,45	0,84	14,00

Caso	Defecto	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico $t < 300^\circ C$	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico $300^\circ C < t < 700^\circ C$	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico $t > 700^\circ C$	<0,2	>1	>4



Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, el análisis muestra una descarga de alta energía.

4.2.2. Caso ejemplo 2: descargas parciales en el aceite de un transformador.

Este ejemplo pertenece a unas descargas parciales en el aceite de un transformador.

Los resultados incluidos en la tabla 15 corresponden a un transformador de 1.500 KVA del fabricante DELTA STAR situado en una subestación de planta.

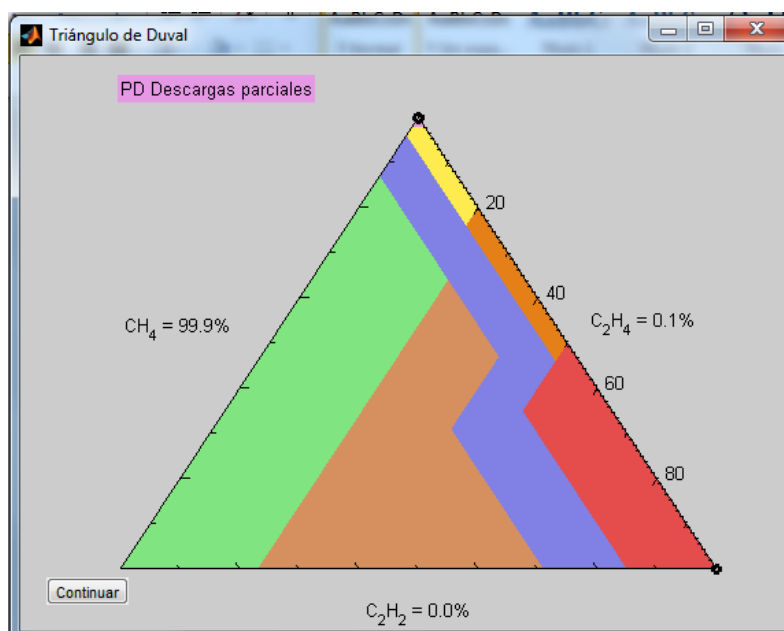
Tabla 15. Ejemplo 2. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
04/19/00	35882	1201	16043	8470	97	2139	1290	7	2	46597	65131

Diagnóstico: el gas clave, hidrógeno, indica descargas parciales de baja energía sin celulosa involucrada.

Hallazgos: unidad con problemas de diseño. Continuará funcionando hasta que pueda reemplazarse.

Figura 16. Ejemplo 2.



Cómo se puede observar en la figura 16, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “descargas parciales” lo que concuerda con lo descrito en el libro de Myers [3] que indica que existen descargas parciales de baja energía sin celulosa involucrada.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

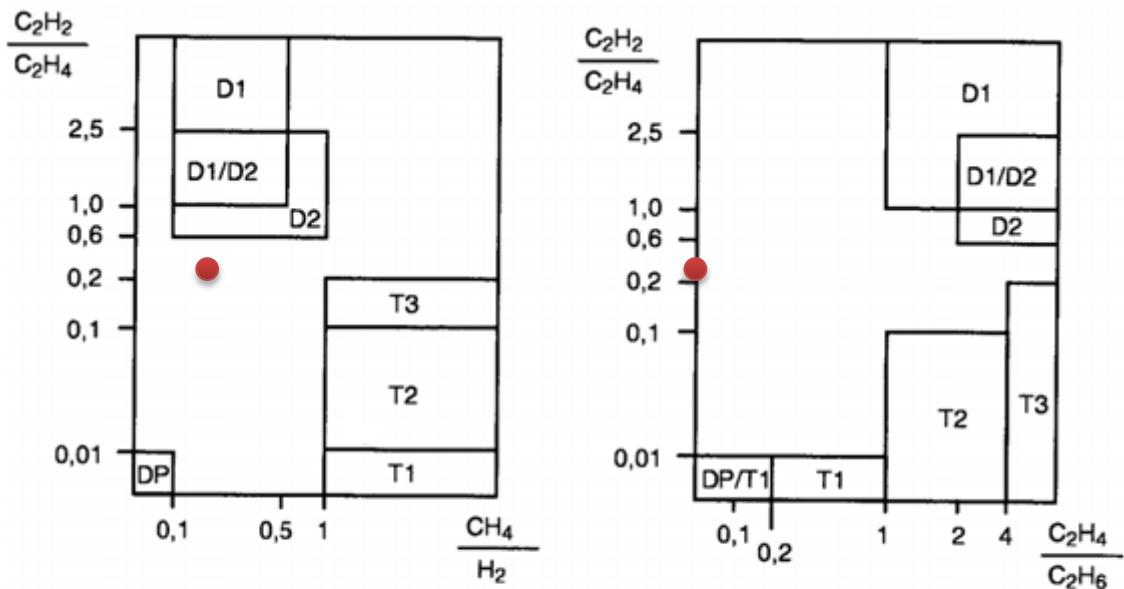
Los valores marcados (Hidrogeno, Metano y Etano) están por encima de los valores típicos obtenidos, por lo tanto, es necesario realizar un estudio sobre este

transformador por posible fallo.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
0,29	0,24	0,00

Caso	Defecto	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico t<300°C	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico 300°C<t<700°C	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico t>700°C	<0,2	>1	>4



Clave	DP	Descargas parciales
	D1	Descargas de baja energía
	D2	Descargas de alta energía
	T1	Defecto térmico, t < 300 °C
	T2	Defecto térmico, 300 °C < t < 700 °C
	T3	Defecto térmico, t > 700 °C

Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, el análisis muestra una descarga de alta energía.

4.2.3. Caso ejemplo 3: arco eléctrico en la celulosa de un transformador.

Este ejemplo pertenece a un arco en un transformador.

Los resultados incluidos en la tabla 16 corresponden a un transformador de 13.500 KVA del fabricante WESTINGHOUSE situado en una subestación.

Tabla 16. Ejemplo 3. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

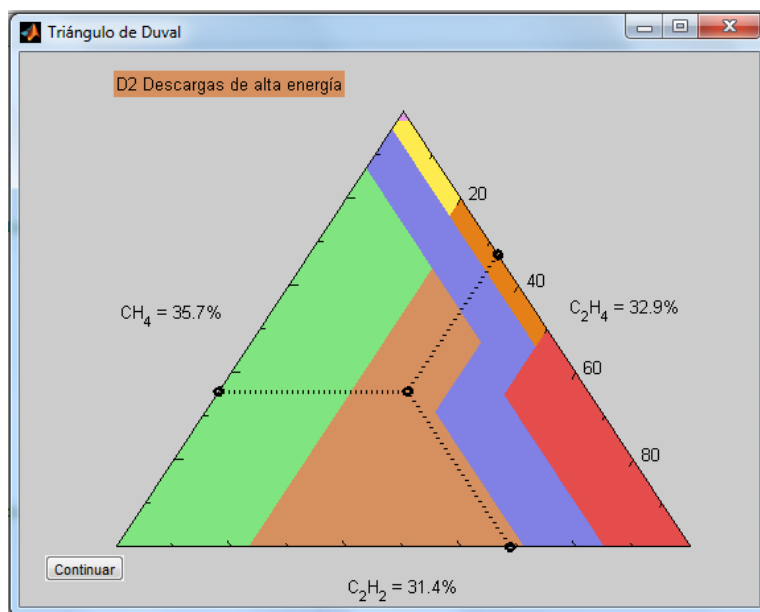
Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
11/13/99	35	9250	81154	25	71	ND	170	23	22	176	91750

Diagnóstico: el gas clave, acetileno, y el monóxido de carbono indican que hay una condición de arco con celulosa involucrada.

Hallazgos: el cliente reporto que la unidad desarrolló un arco desde los devanados de alta tensión al tanque.

Nota especial: se considera que un transformador opera satisfactoriamente por debajo de 700 ppm de gases combustible.

Figura 17. Ejemplo 3.



Cómo se puede observar en la figura 17, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “descargas de alta energía” lo que concuerda con lo descrito en el libro de Myers [3] que indica que hay una condición de arco con celulosa involucrada.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

Es necesario realizar un estudio de los gases encontrados en el aceite del transformador debido a que el valor del acetileno está por encima de su rango de valores típicos.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

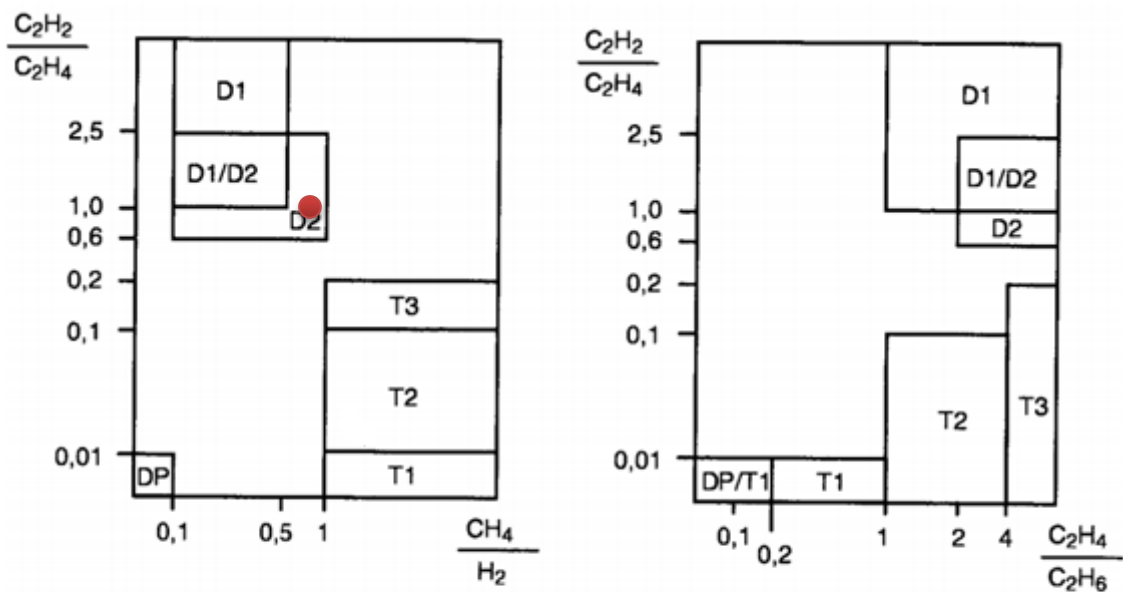
MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆

0,96

0,71

-

Caso	Defecto	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico $t < 300^\circ C$	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico $300^\circ C < t < 700^\circ C$	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico $t > 700^\circ C$	<0,2	>1	>4



Clave	DP	Descargas parciales
	D1	Descargas de baja energía
	D2	Descargas de alta energía
	T1	Defecto térmico, $t < 300^\circ C$
	T2	Defecto térmico, $300^\circ C < t < 700^\circ C$
	T3	Defecto térmico, $t > 700^\circ C$

Gracias a la representación gráfica, el método de Rogers nos indica que en el aceite de este transformador se están produciendo descargas de alta energía.

4.2.4. Caso ejemplo 4: fallo térmico severo.

Este ejemplo pertenece a un fallo térmico severo.

Los resultados incluidos en la tabla 17 corresponden a un transformador de 10.500 KVA del fabricante GE situado en una subestación en zona urbana.

Tabla 17. Ejemplo 4. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

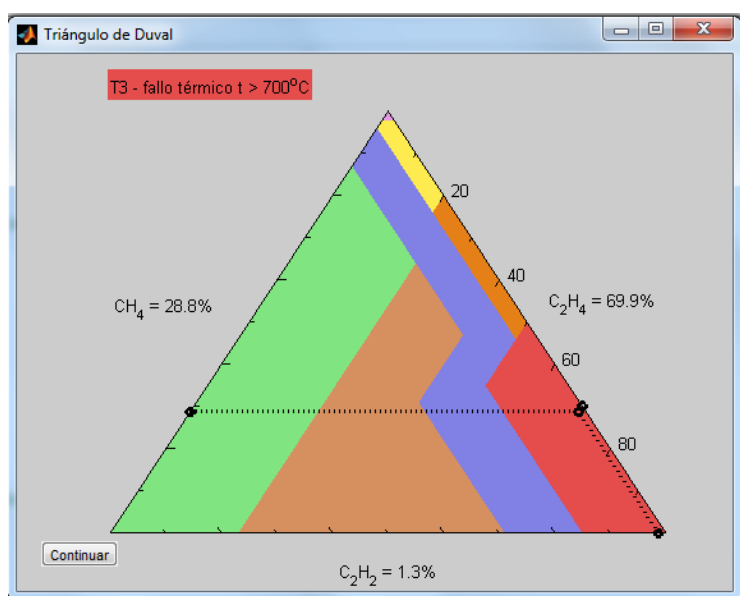
Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
08/17/00	168	7217	55884	1353	67	581	1386	3286	63	5513	70000

Diagnóstico: el gas clave, etileno, con metano y acetileno indican que hay una mala conexión de conductores o una conexión floja.

Hallazgos: se encontró una conexión floja en la placa de terminaciones. Esto se debió al roscado y apriete incorrecto de una tuerca en la fábrica.

Nota: hay baja cantidad de monóxido de carbono. Por lo tanto, se deberá observar que no hay papel involucrado y verificar el contenido de metales para ver si hay algunos disueltos.

Figura 18. Ejemplo 4.



Cómo se puede observar en la figura 18, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “fallo térmico con temperatura mayor a 700°C”. En este caso Myers [3] no habla de ningún fallo concreto reflejado en la lista de Duval.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

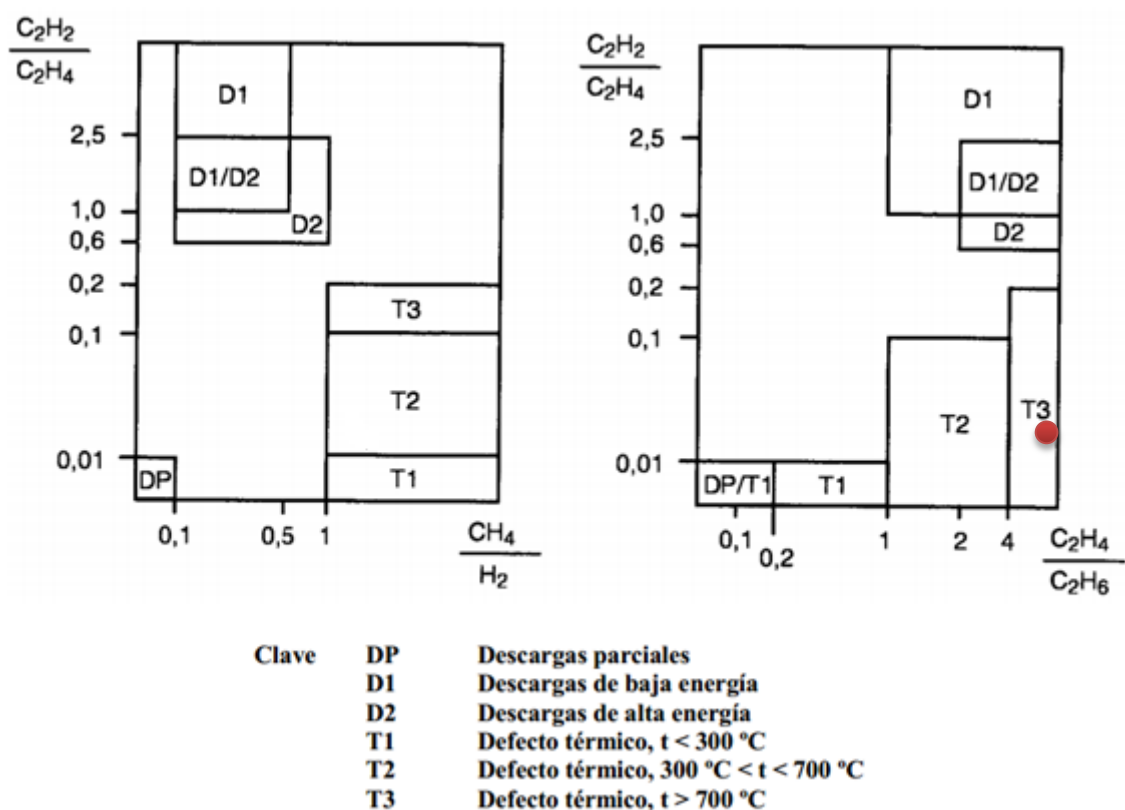
(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

Es necesario realizar un estudio de los gases encontrados en el aceite del transformador debido a que la mayoría de gases se encuentra por encima de los valores típicos.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
0,02	8,05	5,65

Caso	Defecto	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico t<300°C	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico 300°C<t<700°C	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico t>700°C	<0,2	>1	>4



Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, el análisis muestra un defecto térmico de más de 700°C en el aceite del transformador.

4.2.5. Caso ejemplo 5: calentamiento del aceite de un transformador.

Este ejemplo pertenece a un calentamiento térmico del aceite de un transformador.

Los resultados incluidos en la tabla 18 corresponden a un transformador de 5.000 KVA del fabricante S.D. Myers situado a la intemperie.

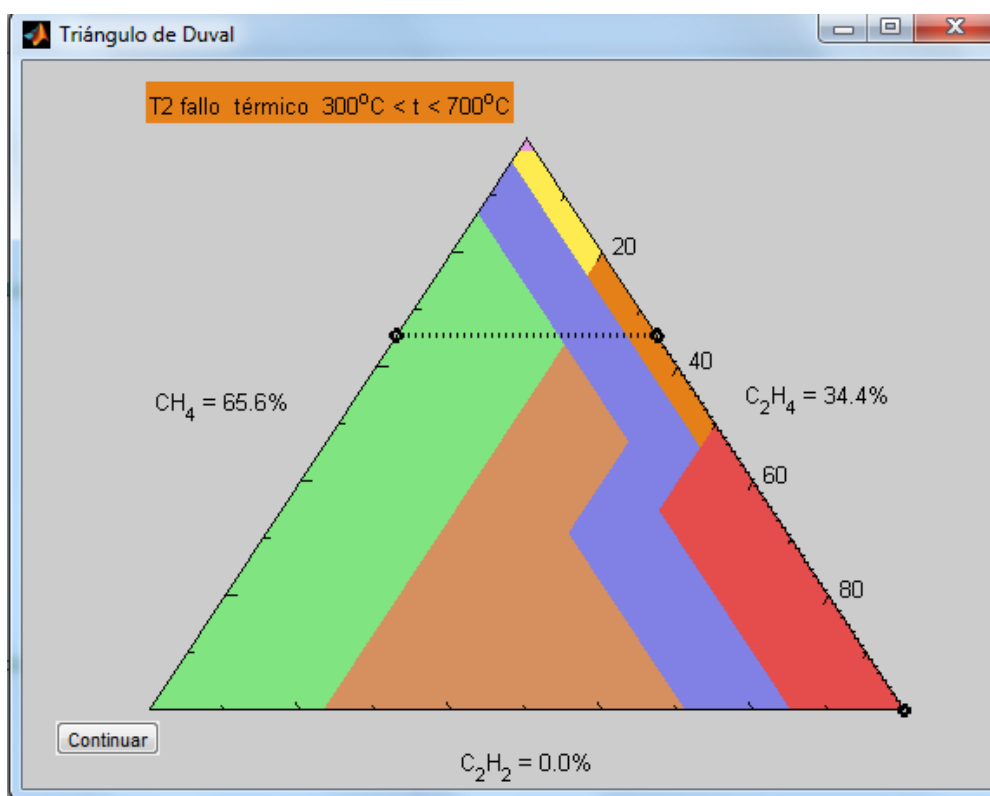
Tabla 18. Ejemplo 5. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
12/29/00	2004	2799	68637	9739	1737	2750	9596	5113	ND	21343	100375

Diagnóstico: el gas clave, etileno, indica un sobrecalentamiento del aceite del transformador en el rango de 350°C - 400°C, posiblemente debido a una mala conexión o una conexión floja en las áreas de terminaciones de conductores o en el cambiador de tomas.

Hallazgos: los pernos y tuercas de acero que conectan los terminales primarios de cobre al aluminio se encontraron carbonizados y fundidos.

Figura 19. Ejemplo 5.



Cómo se puede observar en la figura 19, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “fallo térmico con temperatura comprendida entre 300°C - 700°C” lo que concuerda con lo descrito en el libro de Myers [3] que indica un sobrecalentamiento del aceite del transformador en el rango de 350°C - 400°C.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

En este estudio por el método Europeo es necesario empezar por el siguiente paso:

- Modificar los valores de 0 ppm por “inferior al valor S de este gas”, (S= límite de detección analítico).

Este paso afecta al gas acetileno.

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

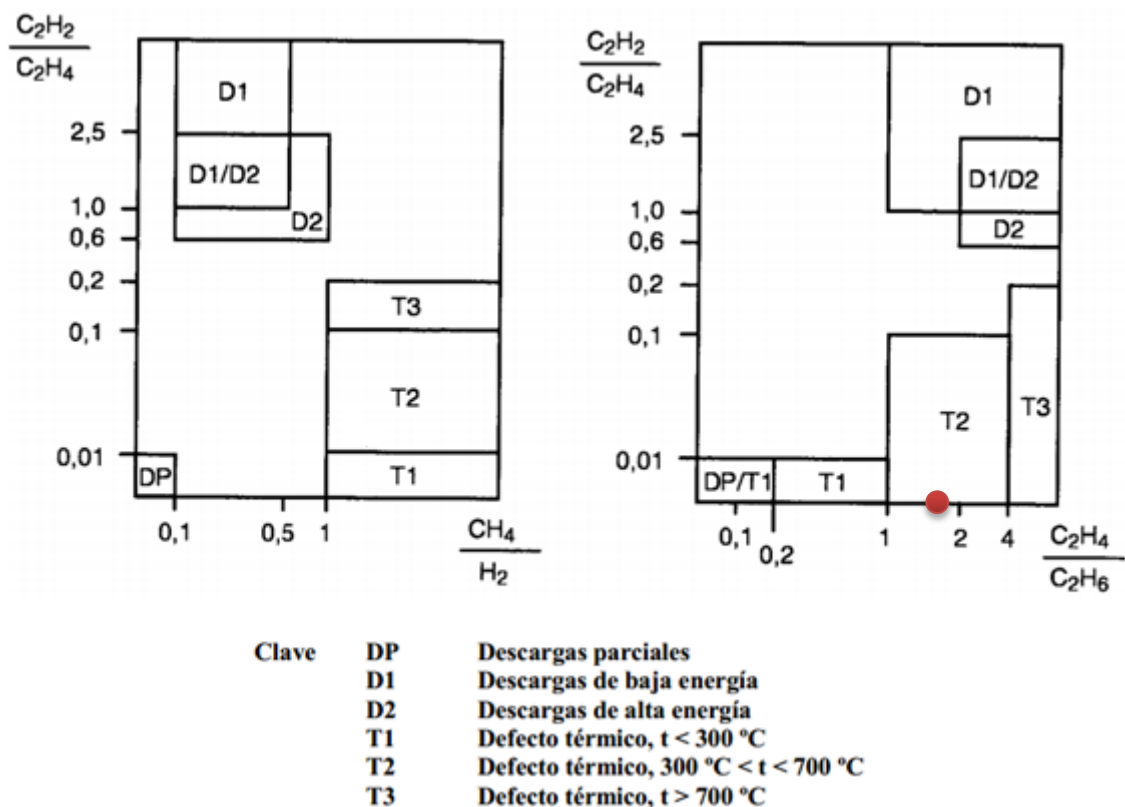
(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

Como se puede observar, excepto por los valores de acetileno y de dióxido de carbono, los valores obtenidos están por encima de su rango de valores típicos de concentración y por lo tanto es necesario investigar los posibles fallos del transformador.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
0,00	4,86	1,86

Caso	Defecto	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico t<300°C	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico 300°C<t<700°C	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico t>700°C	<0,2	>1	>4



Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, el análisis muestra un defecto térmico comprendido entre 300°C y 700°C .

4.2.6. Caso ejemplo 6: calentamiento del aislamiento celulosítico de un transformador.

Este ejemplo pertenece al calentamiento térmico del aislamiento celulosico de un transformador.

Los resultados incluidos en la tabla 19 corresponden a un transformador de 292.000 KVA del fabricante S.D. Myers situado en una zona urbana.

Tabla 19. Ejemplo 6. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combustotal	Gas total
12/11/99	57	2615	13407	13	145	trazas	241	11	12	238	16501
12/14/99	50	3540	15300	10	133	2	290	10	12	217	19347

Diagnóstico: incrementos menores, pero significativos, en el monóxido de carbono y el acetileno. La presencia de estos gases es normalmente indicativa de un arco en desarrollo en el aislamiento celulosítico.

Hallazgos: se encontró una descarga desde la pantalla final al anillo de control de corona en un aislador pasatapas.

Figura 20. Ejemplo 6.1.

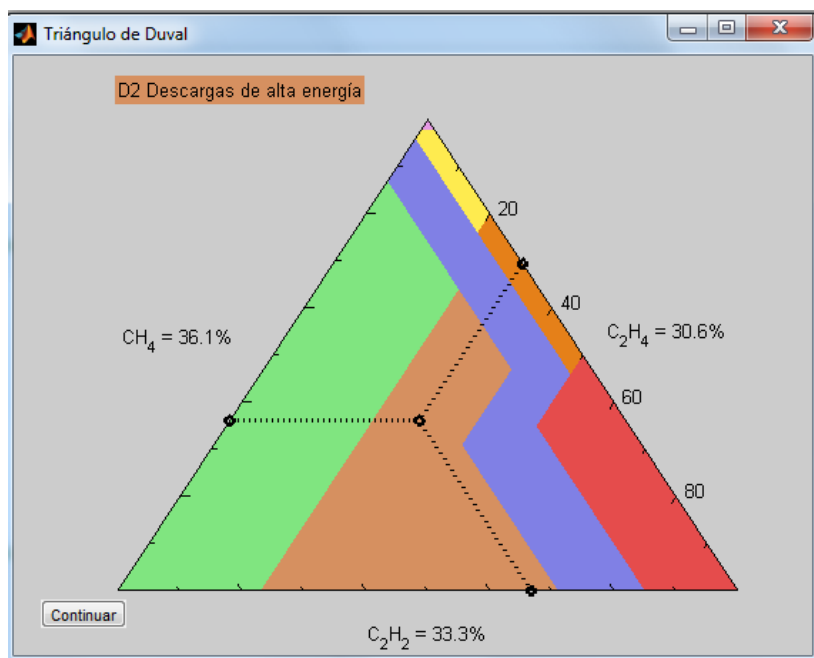
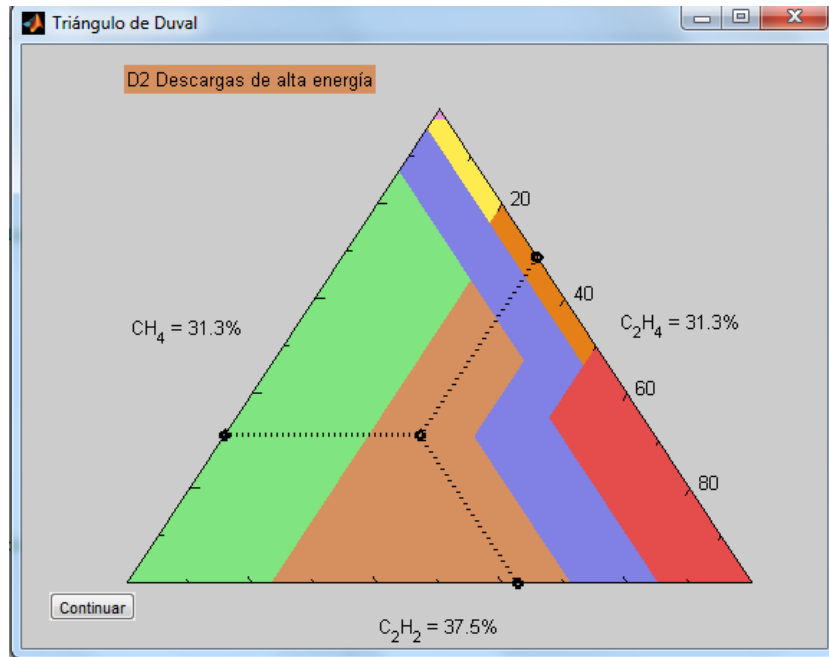


Figura 21. Ejemplo 6.2.



Cómo se puede observar en las figuras 20 y 21, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “descargas de alta energía”.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C_2H_2	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

Al comparar los valores obtenidos en el análisis de gases disueltos en aceite con la tabla de valores típicos, todos los valores de gases obtenidos están por debajo o dentro de los rangos. Esto significa que el transformador actúa correctamente y no es necesario realizar un análisis por posibles fallos.

Análisis por la normativa americana

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

Estado	Límites de concentración de gases claves (ppm)							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG (1)
Condición 1	100	120	1	50	65	350	2500	720
Condición 2	101 - 700	121 - 400	2 - 9	51 - 100	66 - 100	351 - 570	2501 - 4000	721 - 1920
Condición 3	701 - 1800	401 - 1000	10 - 35	101 - 200	101 - 150	571 - 1400	4001 - 10000	1921 - 4630
Condición 4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

(1) Del inglés: "Total Dissolved Combustible gas" Gas combustible disuelto total

- Condición 1 (de 0 a 720 ppm): significa que el transformador de potencia está operando de forma satisfactoria.

Aunque la conclusión nos indica que el transformador opera correctamente, es necesario analizar dicho transformador por posible fallo debido al alto nivel de acetileno.

Mediante el método de Rogers se obtiene el siguiente resultado:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
1,09	0,23	110,00

Caso	R2 C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1 CH ₄ / H ₂	R5 C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	Diagnóstico de errores sugerido
0	<0,1	0,1 - 1	<1	Unidad normal
1	<0,1	<0,1	<1	Descargas de baja energía - PD (a)
2	0,1 - 3	0,1 - 1	>3	Descarga de alta energía
3	<0,1	0,1 - 1	1 - 3	Baja temperatura de defecto térmico
4	<0,1	>1	1 - 3	Defecto térmico < 700°C
5	<0,1	>1	>3	Defecto térmico > 700°C

(a) Habrá una tendencia a que los ratios R2 y R5 aumenten a un ratio por encima de 3 como la descarga desarrollada en intensidad.

El análisis obtenido por el método de Rogers, llega a la conclusión que se está produciendo una descarga de alta energía en el aceite del transformador.

Conclusión:

La presencia de gases como el monóxido de carbono y el acetileno suelen dar lugar a un arco eléctrico en papel usado como aislamiento en el transformador. Los hallazgos encontrados por S.Myers [3] muestran que se encontró una descarga desde la pantalla final del anillo de control de corona en un aislador pasatapas.

El estudio previo realizado por la normativa americana llega a la conclusión que existe una descarga de alta energía dando lugar a un arco eléctrico. Como se ha comprobado posteriormente, esta hipótesis inicial es acertada.

Por el contrario, el análisis realizado por la normativa europea llegó a la conclusión errónea que el transformador actuaba de forma correcta.

4.2.7. Caso ejemplo 7: sobrecalentamiento extremo del aceite de un transformador.

Este ejemplo pertenece a un calentamiento térmico extremo del aislamiento de un transformador.

Los resultados incluidos en la tabla 20 corresponden a un transformador de 13.470 KVA del fabricante GE situado en una subestación.

Tabla 20. Ejemplo 7. Análisis cromatográfico de gases en aceite, expresado en ppm.

Fecha	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Combus total	Gas total
08/05/99	9817	2488	76772	36962	837	11608	6649	62815	2624	124663	10572
08/30/00	23	28365	90420	506	trazas	2229	3972	7836	213	10807	32564

Se detectó olor a arco en el aceite. Se realizaron pruebas a la unidad y se encontró un contenido de gas combustible en el aceite extremadamente alto.

Diagnóstico: el gas clave, acetileno, con grandes cantidades de etileno, indica sobrecalentamiento extremo del aceite.

Hallazgos: se detectó un problema en el cambiador de tomas. Un contacto del anillo interno estaba muy quemado, así como el contacto estacionario.

Aún existe un problema de gas combustible, aunque considerablemente reducido. Volver a probar un mes después para observar cuán rápido se están generando los gases.

Figura 22. Ejemplo 7.1.

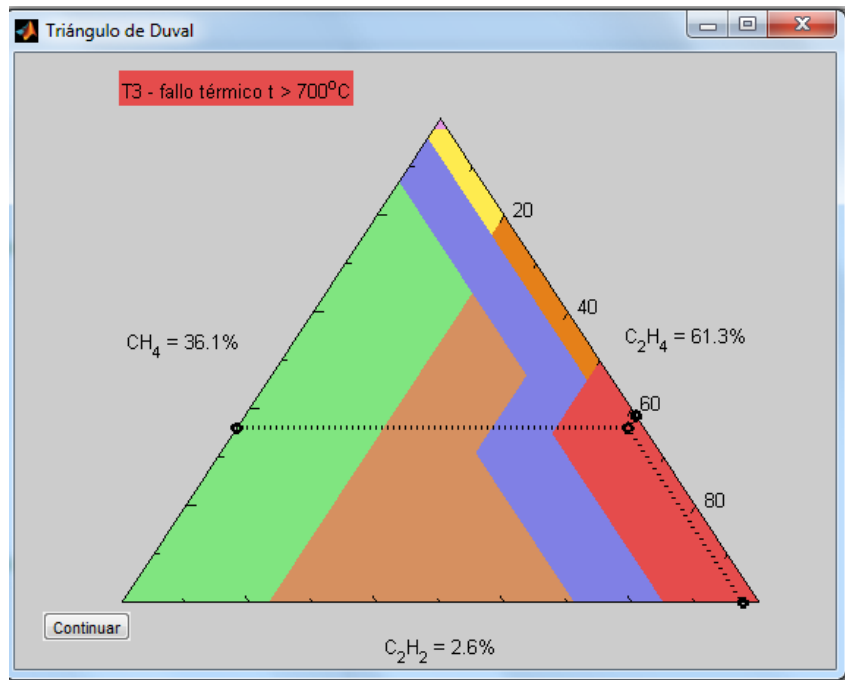
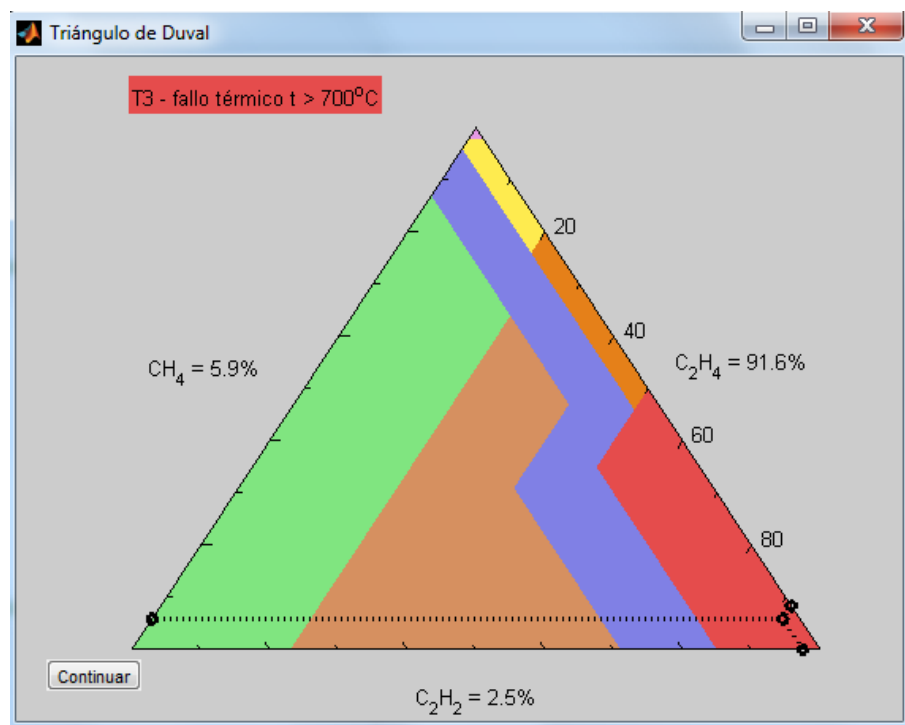


Figura 23. Ejemplo 7.2.



Cómo se puede observar en las figuras 22 y 23, el programa indica que el fallo que sufre el transformador es “fallo térmico con temperatura mayor a 700°C” lo que concuerda con lo descrito en el libro de Myers [3] que indica sobrecalentamiento extremo del aceite.

Comparación con análisis hecho con el método de Rogers:

Los resultados son comparados con la siguiente tabla:

	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Todos los transformadores		50 - 150	30 - 130	60 - 280	20 - 90	400 - 600	3800 - 14000
Sin OLTC (1)	2 - 20						
OLTC (1) comunicado	60 - 280						

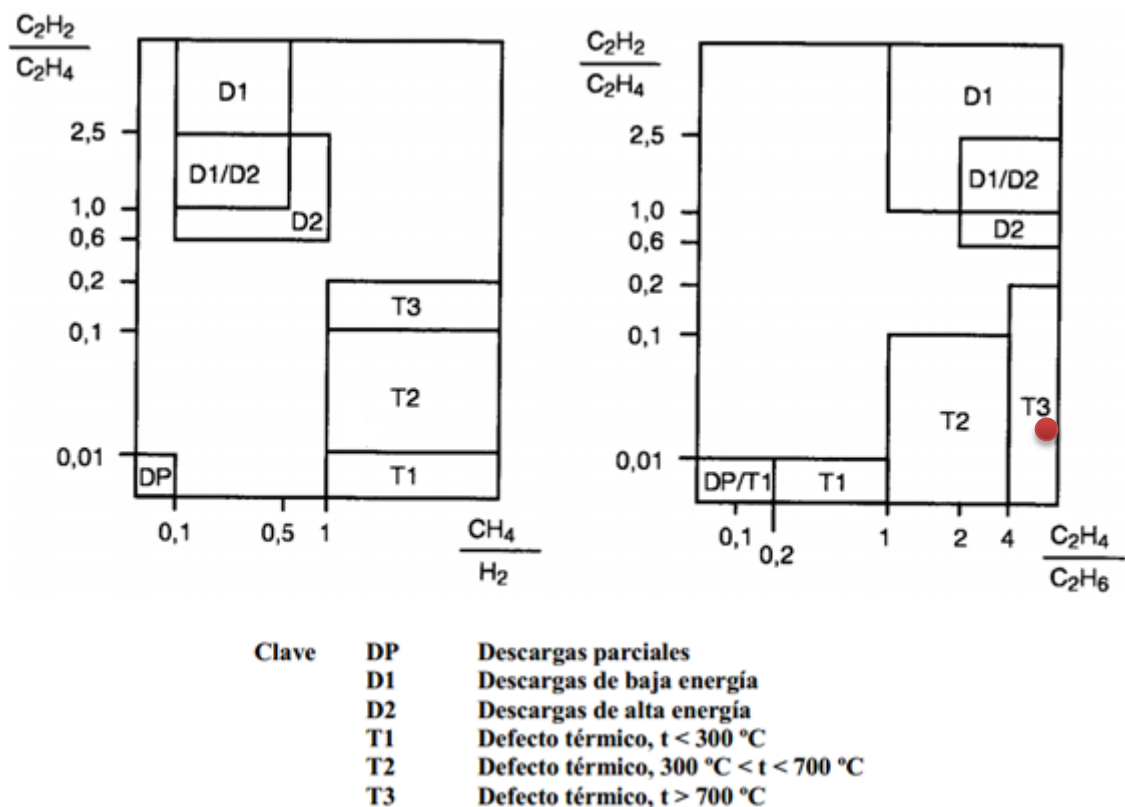
(1) Del inglés: "On Load Tap Changer" Cambiador de Tomas en Carga

Es necesario realizar un estudio de los gases encontrados en el aceite del transformador debido a que excepto el dióxido de carbono, todos los gases se encuentra por encima de los valores típicos.

En primer caso, se estudia el funcionamiento del transformador con el siguiente método:

MÉTODO DE ROGERS		
R2: C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	R1: CH ₄ / H ₂	R5: C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
0,04	3,77	5,41

Caso	Defecto	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆
DP	Descargas parciales	No significativo	<0,1	<0,2
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1 - 0,5	>1
D2	Descargas de alta energía	0,6 - 2,5	0,1 - 1	>2
T1	Defecto térmico t<300°C	No significativo	>1 pero no significativo	<1
T2	Defecto térmico 300°C<t<700°C	<0,1	>1	1 - 4
T3	Defecto térmico t>700°C	<0,2	>1	>4

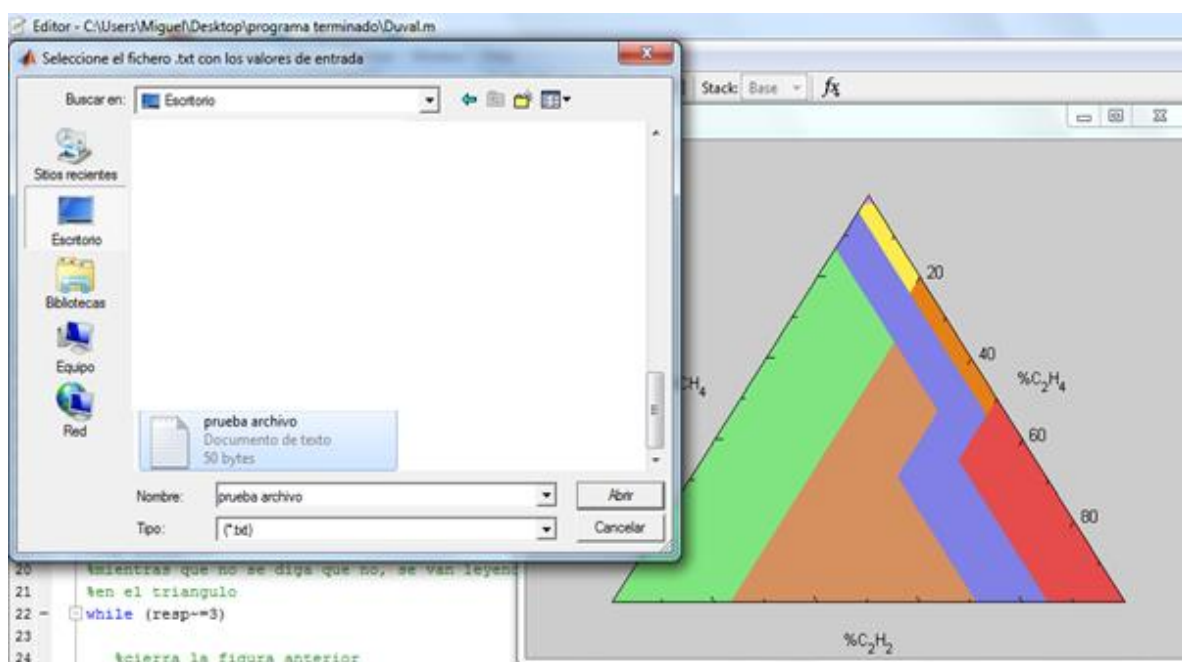


Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, el análisis muestra un defecto térmico de más de 700°C en el aceite del transformador.

4.3. Análisis conjunto de una batería de datos: arco eléctrico y sobrecalentamiento en un transformador.

Lo primero que hará el programa es pedirnos el archivo que deseamos cargar. Para ello abrirá una ventana de navegador donde podremos buscar y abrir el documento de texto que deseemos.

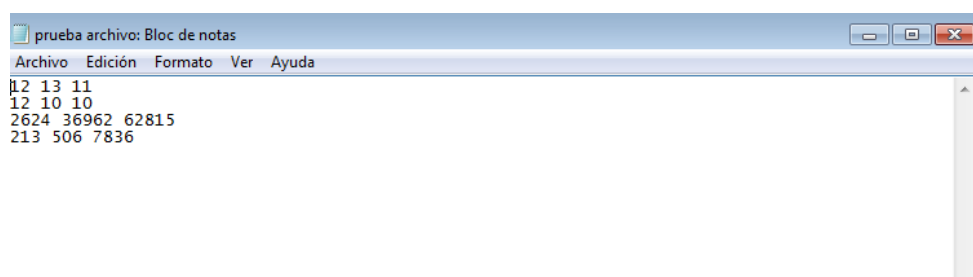
Figura 24. Ventana navegador. Búsqueda del archivo.



Para nuestro ejemplo cargaremos el documento que se muestra a continuación y en el que podemos ver de qué manera están almacenadas las cantidades de gas.

Las cantidades de gas deben introducirse según el orden siguiente: C_2H_2 , CH_4 y C_2H_4 y tienen que tener un espacio entre cantidad y cantidad para que, al leerlo, el programa pueda diferenciar que cifra corresponde a cada gas.

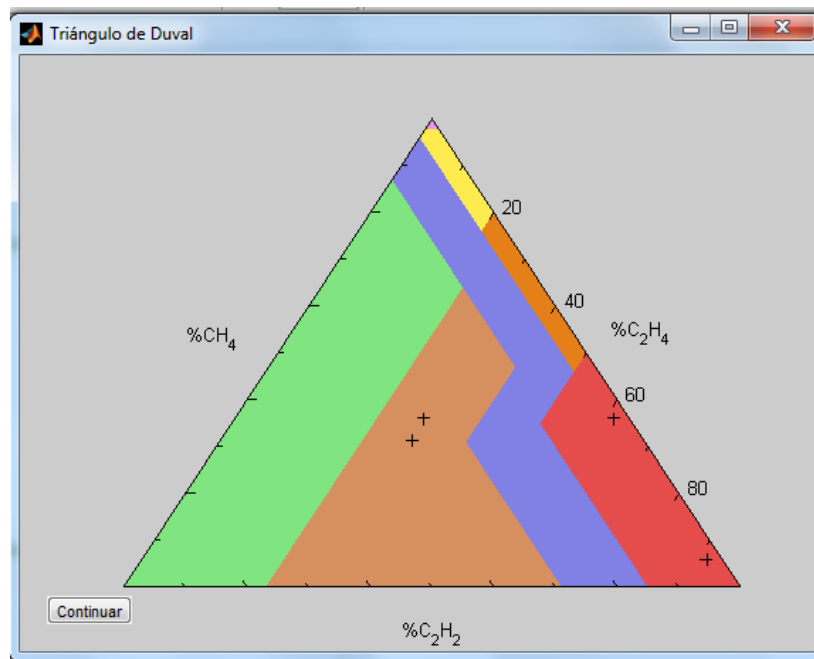
Figura 25. Documento de texto que contiene cantidades de gas de ejemplo.



Estos datos han sido sacados de los casos de ejemplo número 6 y número 7 que corresponden a los fallos producidos por un arco eléctrico y un sobrecalentamiento del aceite del transformado respectivamente.

Al igual que se han cogido estos valores se podrían coger otros, pertenecientes a un mismo transformador, tomados con ciertos intervalos de tiempo y, de esta manera, estudiar cómo evoluciona el fallo a lo largo de un periodo de tiempo.

Figura 26. Representación de varios puntos.



Se puede observar cómo se representan los mismos puntos que dan como resultado en dichos ejemplos dándonos una idea de cómo cambia la tipología del fallo según evolucionan las proporciones de gases disueltos en el aceite del transformador.

5. Conclusiones.

El objetivo de este trabajo ha sido doble. Por una parte se ha buscado entender la importancia del análisis de los gases disueltos (GDA) en el aceite de los transformadores para prevenir grandes daños en estos equipos tan caros y delicados y revisar qué técnicas son más empleadas para la interpretación de los resultados de estos análisis.

Dentro de esta primera parte del proyecto se estudió en qué consiste el análisis de gases disueltos en el aceite dieléctrico, normativas relacionadas con la técnica y métodos de diagnóstico empleados para realizar un diagnóstico a partir de los resultados experimentales. Una de estas técnicas de interpretación es el Triángulo de Duval, que ha cobrado gran popularidad y es muy usado en la actualidad gracias a su fiabilidad.

El segundo objetivo consistió en desarrollar un programa informático que implementa el triángulo de Duval para un uso sencillo y una rápida identificación de los posibles fallos que pueda sufrir un transformador.

El programa informático se ha realizado con el software de programación de Matlab. El programa carga una ventana en la que se visualiza el triángulo de Duval con sus correspondientes zonas, coloreadas de un color diferente cada una, y nos da diferentes opciones de funcionamiento.

La primera opción consiste en introducir las cantidades de los gases CH_4 , C_2H_2 y C_2H_4 y el programa se encarga de hallar las proporciones de los tres e indica en qué zona del triángulo se encuentra y su fallo correspondiente.

La segunda opción del programa carga un documento de texto que contenga los resultados de distintos análisis de y representa los puntos del triángulo donde se encuentran los fallos pertenecientes a esas proporciones de gases.

Por último se ha aplicado el programa desarrollado a distintos casos de ejemplo comprobando su buen funcionamiento.

Estos casos de ejemplo se han sacado del libro de S.D. Myers [3] y corresponden a casos reales de pruebas en transformadores.

La finalidad de este trabajo ha sido, por un lado, didáctica y, por otro lado, práctica. Con él se han aprendido aspectos sobre el análisis de gases disueltos en el aceite del transformador ofreciendo una introducción a esta técnica. Además, empleando el

programa informático se puede visualizar de manera práctica y experimental lo aprendido anteriormente y hacer pruebas de las posibles evoluciones de un fallo producido en un transformador mediante la evolución de las proporciones de los gases que se encuentran disueltos en su aceite dieléctrico.

6. Bibliografía.

- [1] *“Análisis de aceites dieléctricos y su significado”, laboratorio de fluidos dieléctricos – TEKNIKER.*
- [2] *“interpretación del análisis de gases disueltos en aceite”, TFG de Rubén López García.*
- [3] *“Guía para el mantenimiento del transformador” de S.D.Myers.*
- [4] *“Análisis de gases disueltos en aceite para el mantenimiento preventivo a transformadores de potencia”*
- [5] *“guía para el mantenimiento de transformadores de potencia”*
- [6] *“Analysis and Interpretation of Dissolved Gases in Transformer Oil”, S. N. Hettiwatte; School of Engineering and Energy, Murdoch University (Murdoch, Australia).*
- [7] *“A Software Implementation of the Duval Triangle Method”, A. Akbari*, A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach; Institute of Electric Power Systems, High Voltage Engineering Section (Schering-Institut) Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 25 A, 30167 Hannover, Germany.*
- [8] *“Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle”, Michel Duval.*
- [9] *“Diagnóstico de condición de equipos de subestaciones eléctricas de alta tensión”, MsC Ing Javier Acevedo, Consultor para Latinoamérica Doble Engineering Company.*
- [10] http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31317-duval-triangle/content/Duval_v7.m